

II-52

ダムによる低水管理について

北海道開発局	正 員	許士 達広
	正 員	渡辺 和好
(株)建設技術研究所	正 員	下田 明

まえがき

近年渇水が頻繁に生じており、地球環境問題にも関連して流域スケールの利水運用についての問題が改めて提起されている。ダム群の最適低水運用についてはダイナミックプログラミング(DP)によるもの、渇水持続曲線(DDCルールカーブ)によるもの等の研究がされてきているが、取扱い上の問題があり多目的ダムにおける実用化には至っていない。本報告は従来のDDCルールカーブには考慮されていない点の改良を中心に、ダム群の操作法について検討し、今後の利水総合運用システムモデル作りの基礎とするものである。

1. DDCルールカーブの問題点

ダムの低水運用については、取扱いの容易さからDDCルールカーブが評価されつつある。これは既往の流量資料から確率流量時系列を求め、節水を行った場合の確保容量曲線により等渇水危険度ライン(ダムが渇渇する危険度が等しくなる容量のライン)を描くものであるが、実用に向けて幾つかの問題点及び可能性が指摘される。

①現在公共事業として建設されるダムは、計画時に対象となった年数の各時点の確保容量の順序確率値を抱格したものを確保するように操作規則が定められている。これは従来のDDCルールカーブとは一致しないため、DDCルールカーブを用いる場合には両者の整合を図る必要がある。

②現在のDDCルールカーブにおける‘季節の早遅の影響’の位置づけを明確にする必要がある。

③ダムの利水容量が定められた場合の最適DDCルールカーブの描き方(最適確率年)及びその決定のための渇水指標の設定方法が明確になっていない。

④実際の節水操作は、利根川流域などに見られるように一定水位以下になって初めて節水する段階節水方式とられている。一方DDCルールカーブでは貯水池が満水に近くても確保容量をわれれば節水するため、実際には渇水にほど遠い状態でも節水操作をしてしまうことがあり、両者の特性を考えた工夫が必要である。

⑤2つ以上の目的がダムに参加している時、各々の目的は通常異なった渇水被害関数を持つ。この場合の最適節水操作を考える必要がある。

⑥流域ダム群に対する最適節水ルールの実用的決定方法が必要である。

⑦容量確保曲線の考え方を拡張して節水ばかりでなく低水全体の効果的な運用ルールを作る必要がある。これらについて石狩川支川豊平川(豊平峡ダム・定山溪ダム)のS26年～63年の38年間(1部は61年迄)を使って検討する。取水は定山溪ダム全体計画書のパターンを用い、さらに定山溪ダム直下維持流量、豊平峡ダム観光放流量を考慮している。節水は渇水時には正常流量にもかかるケースが多いため、上水道と正常流量を合わせたものに対して一様にかけ、その後配分するようにしている。

2. 現在のダム計画の考え方とDDCルールカーブの整合性

DDCルールカーブは1口に言って流量の順序統計確率値による確保容量曲線であり、今後Ns時間に貯水池が渇渇しないために時点毎に確保しておかなければならない貯水量を、時点を移動しながら結んだものである。これに対し従来の計画の考え方と同様に、節水率をかけた確保容量について各期(半旬)毎の容量の順序確率値をとると、DDCルールカーブと同様の節水曲線を描くことができる。これを擬似DDCルールカーブとよぶことにし、豊平川の豊平峡、定山溪2ダムの流入量を1体とした仮想ダムに対し、DDCルールカーブと擬似DDCカーブを、仮想ダムの制限水位に合わせた規模のものでS26～61年迄のデータを用いて描くと図-1、2のようになる。ここで分かる様に2つのカーブはほぼ同様の形状を示し、渇水指標もほぼ等しい(平成元年度局技参照)。

DDCルールカーブは以下の式で表わされ、任意の危険率 P_k に対して α をパラメータとして各時点における $V_k(\tau, \alpha)$ を結んだものである。

$$f_k(m|\tau) = K - \text{the smallest} \left\{ \min_{j=1,2,\dots,n} \left(\frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t_1+m-1} q_t \right) \right\} \dots \textcircled{1}$$

$$(j, \tau - S/2) \leq t_1 \leq (j, \tau + S/2)$$

$f_k(m|\tau)$: 順序統計量の小さいほうから k 番目の資料による季節別 DDC
 季節別 DDC とは過去の流量観測資料の移動平均をとって求めた流量標準値を意味する
 (j, τ) : j 年目、 τ 時点 m : 時間間隔 (移動平均をとる範囲)
 s : 季節早遅の考慮期間 ($s=0$) とする q : 流量 n : 流量資料のある年数

$$\tilde{q}(m|\tau) = f_k(m|\tau) \cdot m - f_k(m-1|\tau) \cdot (m-1) \dots \textcircled{2}$$

$$\tilde{q}(m|\tau) : \tau \text{ 時点から始まる } m \text{ 時間目の想定流入量}$$

$$p_k = k / (n - N_s) + 1 \dots \textcircled{3}$$

$$p_k : \text{危険率 (渇水確率年の逆数)} \quad k : \text{順序統計量の小さいほうからの順位}$$

$$n : \text{流量年数} \quad N_s : \text{渇水を考慮する時間間隔}$$

$$V_k(\tau, \alpha) = \max_{1 \leq n \leq N_s} \left[\sum_{i=1}^n \{ (1-\alpha) W(m|\tau) - \tilde{q}(m|\tau) \} \right] \dots \textcircled{4}$$

$V_k(\tau, \alpha)$: τ 時点で確保すべき貯留量 α : 節水率

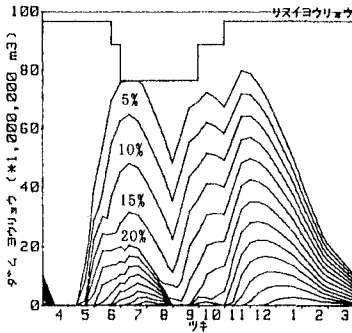


図-1 基準DDCカーブ

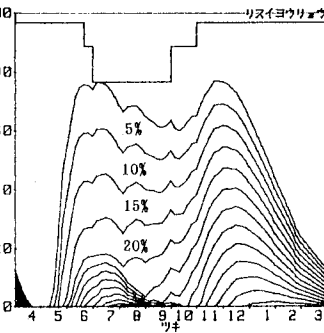


図-2 擬似DDCカーブ

擬似 DDC ルールカーブは従来の DDC ルールカーブと同様の効果を持つ。仮にダム計画時に定めた確保容量をそのまま生かすすると、ダム計画時に用いた分の流量を用いて擬似 DDC ルールカーブを作れば、計画と管理のカーブは一致する。但し、ダム計画決定時から完成時までの流量資料がダム管理に反映しないことになる。擬似 DDC ルールカーブは DDC ルールカーブと同様の効果を持つが、擬似 DDC ルールカーブの容量から逆算される流量時系列は取水パターンにより異なる等の問題もある。

3. 渇水確率と渇水指標の影響

豊平川の38年間の確率流量を用い、2ダム1体の仮想ダムに対し1/38～10/38まで節水の確率年を変化させて DDC ルールカーブを描き、各々について38年間分の渇水指標を計算する。図-3は1/38、図-4は5/38及び10/38渇水確率の図であり、また図-6は渇水指標として不足量、($\%$) $\cdot$ day、($\%$) 2 day、($\%$) 3 day、

利水容量 (百万 m^3)

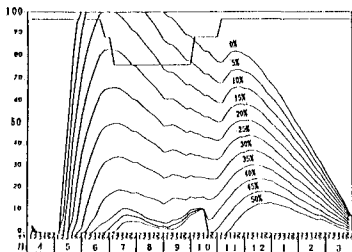


図-3 1/38年確率DDCカーブ

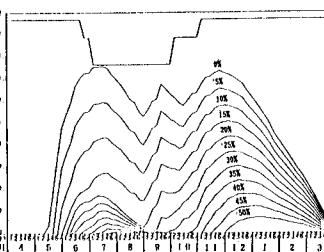


図-4 5/38年確率DDCカーブ

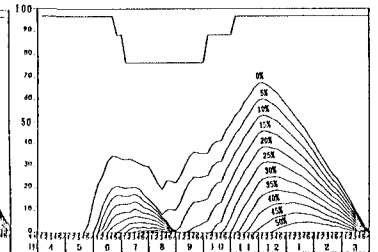


図-5 10/38年確率DDCカーブ

($\%$) 4 day、($\%$) 5 day を用い、それぞれについて38年間分の渇水指標率年を、各確の DDC ルールカーブに対し計算したものである。

図-3の1/38確率年のように制限水位や常時満水位とクロスする節水ラインを持つ場合は、どんな豊水年でも節水するゾーンを通るため渇水指標が大きくなってしまいう傾向がある。豊平川の2ダムの節水率ゼロの確保容量が常時満水位と接するのは図-4の5/38年付近で(これを基準DDCとよぶことにする)、それ以上の確率年の指標は常時満水位や制限水位にクロスする節水ラインの影響をうけている。このためそれらのラインを除いた、例えば1/38年確率であれば、図-7のような形での渇水指標で比較してみる必要がある。図-6の破線は常時満水位、制限水位とクロスする節水ライン有りの場合で、実線はそれが無い場合である。クロスするラインは、特

に常時満水位や制限水位に接する点の左側では確率的意味を持たない線であり、現実的にはダム確保容量より上で節水をかけにくいいため、ここではクロスラインを除いた場合で最適確率年を比較する。

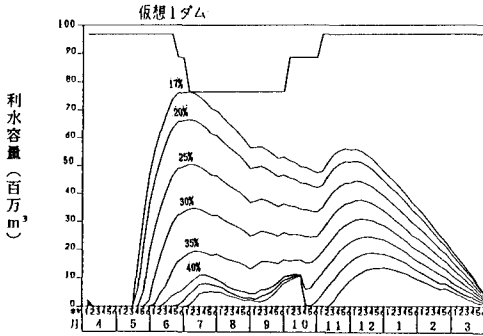


図-7 クロスラインを除いたDDCカーブ(1/38年)

渇水指標のうち不足量は、図-6 から分かるように節水確率年が小さいほど小さく、すなわち節水をかけない方が効果的であることになる。これは節水量を不足量の一部にカウントする場合、一つの渇水の不足量を節水によって減らすことができないことから理解される。つまり節水を行った場合に、その年の渇水が終わった時点で一定の容量が残っている場合は、無駄な節水として不足量の増となったことになり、節水により指標が悪化する。 $\%day$ も不足量と同じ内容を持つ量であり、同じ傾向を示す。従って $\%day$ のような節水率の1次モーメントは渇水の大きさを表す指標としては適当でも、渇水の厳しさを含まないため、ダムの運用ルールの効果の判断のための指標としては適当ではないといえる。

$(\%)^2day$ は6/38確率年が最小となるが、あまり明瞭な差は生じない。 $(\%)^2day \cdot \text{不足量}$ は通常渇水被害関数とよばれるものであり、 $(\%)^3day$ と同じ次数の指標である。これらの値と $(\%)^4day$ はダム計画規模の5/38確率年が最小となる。 $(\%)^5day$ は3/38確率年で最小となり渇水指標により最適渇水年が変化することが分かる。

以上のプロセスをダム規模を変えて実施してみる。各確率の節水率ゼロの確保曲線に接するようにダム規模を変えると、 $(\%)^2day \cdot \text{不足量}$ は図-8 の様な状況となり、ダム規模の確率年により最適節水カーブの確率年も異なることが分かる。節水なしの場合と比べると、ダム規模が小さくとも節水の方法次第で被害が大幅に減少しており、最適運用方法と開発規模の両方を考えた経済効果の算定や、水資源政策の決定の有効性を示している。この場合渇水指標の選定が重要なことは言うまでもない。

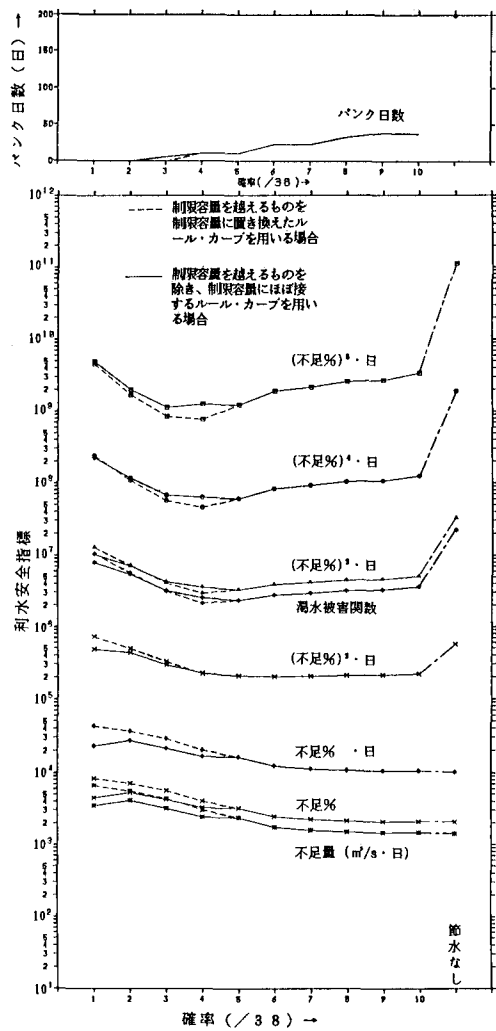


図-6 渇水指標と最適確率年

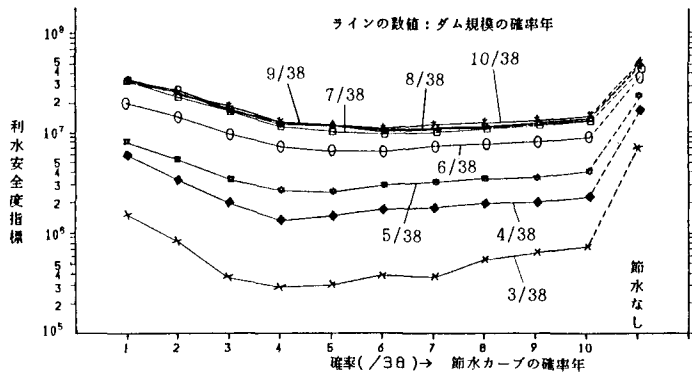


図-8 ダム規模による最適確率年と指標(渇水被害関数)

4. 季節早遅の影響

DDCルールカーブの式①における早遅の考慮期間Sについては過去にも議論のあるところであり、その効果を確認してみる。Sを2半旬、4半旬と変化させると表-1に示すように、パンク日数以外の渇水指標は $S=0$ とした方が効果的である。DDCカーブ自体は図-9に示すようにSを大きくする($S=8$)と縦横に広がる。(比較のため $S=0, 4$ の場合の節水率ゼロの線を破線及び1点鎖線で重ねている。)これはDDCカーブはSの範囲で移動平均をとって、その最小値を選ぶため流量時系列が小さくなるからである。このように早遅の考慮期間の影響を入れてDDCの節水カーブを描くと、むしろ各節水の影響は大きくなって、ダムの渇水時の運用上パンク日数以外はマイナスに働く。

ここで季節早遅の考慮期間Sについて、その意味するところを考えてみる。これは例えば梅雨入りが、ある年の5月20日であっても次の年は6月20日であるというように、気象の偶然変動による季節のずれがあり、その可能な期間長を示すものである。これが①の式のSの定義であり、初霜のおりる時期なども同様に考えられる。これを低水流量の場合で考えてみる。仮にある河川の取水地点の施設が一定の渇水位まで取水可能であり、それ以下の場合は別途補給施設が必要となるとする。その期間が例えば1/10確率では8月の中間の15日間だけであるとしても、別途補給施設の供給可能な期間を安全のため一定の期間(例えば8~9月の2ヶ月)に伸ばしておくということは計画上考えられる。これは通常確率値以上に、ある自然現象の起こり得る期間を広くとり安全度を上げるということである。しかしこの場合でも補給施設(例えばため池など)の容量を2ヶ月分に必要があるかどうかは問題である。①式における早遅の期間の考慮では、同様な現象が生じ得る期間の移動平均の最小値をそれぞれの時点でとるため、その期間で常に値が小さくなる。従って確率流量時系列が小さくなり、当然確保容量が大きくなるが、一方既設ダムの貯水容量は変わらない。このため、節水頻度が高い分渇水指数が大きくなり、効率が悪くなるのである。

5. 節水の空振り問題への対応

流域スケールの節水ルールとして幾つかの流域で‘段階節水方式’が用いられている。これは通常時期に関係なく、一定の水位より下がれば節水を段階的にかけるものである。一方DDCルールカーブは既往流量データの

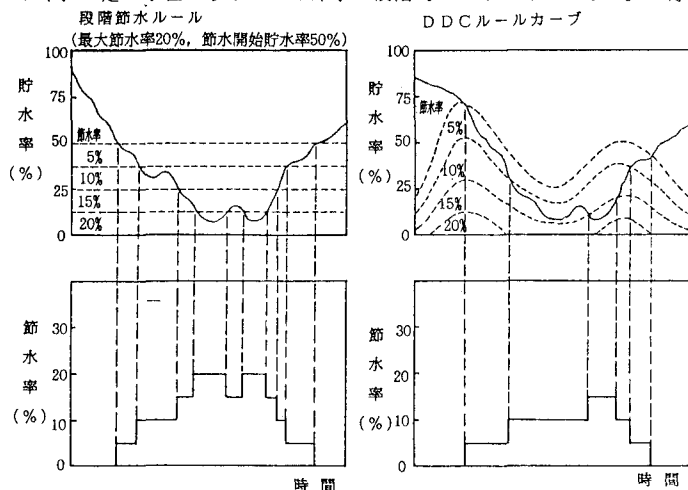


図-10 運用ルール概念図

表-1 早遅のSの影響(5/38年)

利水安全度指標	S=0	S=2半旬	S=4半旬	S=8半旬
N'の日数	11	0	0	0
(不足%)day	16.2×10^3	18.0×10^3	19.1×10^3	21.6×10^3
(不足%) ² day	205×10^3	222×10^3	248×10^3	310×10^3
渇水被害関数	2341×10^3	2473×10^3	2917×10^3	4062×10^3

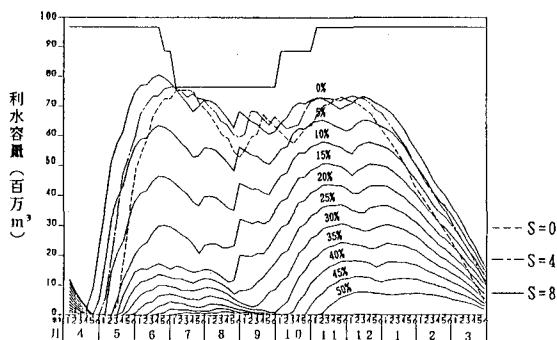


図-9 S=0とS=4, S=8半旬の比較(5/38年)

時期別確率値をとり入れており、時期にかかわらず水位のみにより節水率の決まる段階節水方式よりも、通常渇水指標を小さくする効果は大きい。両者の概念図を図-10に示す。例えば、節水率10%の段階節水のラインと、各確率年の10%節水DDCの位置関係が

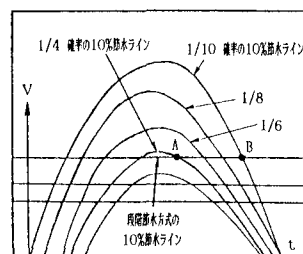


図-11 段階節水とDDCの関係

図-11の様になっていれば、水平な段階節水ラインはA点からB点に移動するうちに確率が1/4 から1/10に変化しており、一定の安全度を持つとはいえない。

一方、DDCカーブにも欠点はある。前節で検討した様にDDCカーブが効果的なのは、基準DDCのように常時満水位や制限水位に接するようなカーブである。実際のダム操作を行うときにそのまま運用すると、ダム湖には満々と水が貯留されているのに節水しなければならないということが生じる。しかし現行のダムは、確率容量を少しでもわつたら上水道が節水するというような運用はしていない。それは確保容量をわりこんでも別に被害が生ずるわけではなく、このままでは貯水池が涸渇して水供給ができなくなる確率が一定以上あるというに過ぎないからである。もちろん水位が高くても節水した方が利水安全度は高いが、実際は、節水しなくとも貯水池が涸渇しなかった時に、実施していた場合は人工渇水となってしまう、かえって被害を作り出してしまふ。この問題は治水の予備放流と同様であり、行った場合にはある程度の損害と下流域住民の不安といったことを伴うため、実施すべきときにしなかったという‘見逃し’の失敗と、実施すべきでないのにやってしまったという‘空振り’の失敗の重みを考えながら行う必要がある。

こういった問題の解決のため、段階節水とDDCカーブの折衷型の方法を考えてみる。一番簡単なのは、貯水池の容量毎に何段階かに分けて節水の確率を変えることである。つまり水位が高い部分は確率流量の大きなものとし、水位が低いところでは確率流量の小さなものとしてその中間を段階的に変化させて、つなぎの部分に緩和の線を入れてなめらかに接合させていくのである。図-12及び表-2はその例である。これにより空振りの頻度はある程度減少可能となる。各水位の確率年、例えばある容量の範囲で確保容量をわりこんだ場合に、節水操作を全くしなければ、そのうちのどれだけの割合でダムが涸渇するかといった指標をみたくて決定されるべきである。どこまで空振りを許すかという点は渇水指標と合わせて行政的判断が必要となる。この方法の別なメリットとして、例えば図-4の5/38年のカーブでは、4月の前半などは渇水の確率が高いのに節水ルールがなく、ダムが涸渇する確率が高かったが、この方法で水位の低い部分の確率年を大きくとることにより解消できる。また渇水指標によっては、こうすることによりより節水効果を高めることも考えられる。

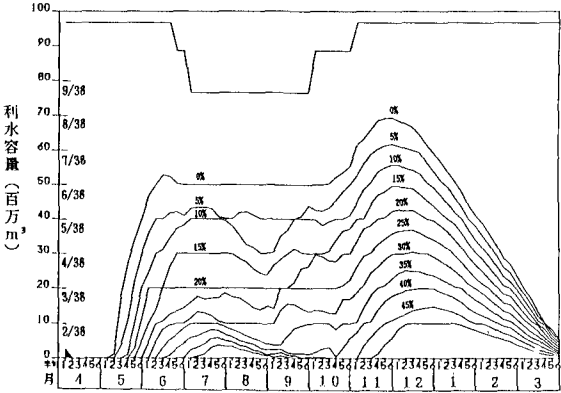


図-12 段階節水DDC (2/38～9/38)

表-2 段階節水DDCの効果

確率年	涸渇日数	不足量 ¹ day	(不足量) ² day	渇水被害関数
1/38～8/38	0	14.5×10 ³	249×10 ³	3483×10 ³
2/38～9/38	0	12.9×10 ³	222×10 ³	3077×10 ³
2/38～5/38	0	18.5×10 ³	235×10 ³	2554×10 ³
5/38	11	16.2×10 ³	206×10 ³	2341×10 ³

6. 複数利水目的の場合のルールカーブ

多目的ダムには2種類以上の利水がのっていることが多い。不足量に対する渇水被害は利水目的毎に異なるものであり、これらを考慮した節水ルールカーブ作りが必要となる。例えば目的Aの渇水指標が(%)ⁿday、目的Bの指標が(%)^mdayで、それぞれが利水のα%及びβ%を占めるといったケースを考えると以下の式となる。

$$\sum \left\{ \alpha_i \left(\frac{O_{PAi} - O_{RAi}}{O_{PAi}} \right)^n + \beta_i \left(\frac{O_{PBi} - O_{RBi}}{O_{PBi}} \right)^m \right\} \dots \textcircled{5}$$

$$O_{RI} = O_{RAi} + O_{RBi} \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

$$S_i = S_{i-1} + I_{RI} - O_{RI} \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

O_{PAi}, O_{PBi} ; i 時点の目的A,Bの計画取水量
 O_{RAi}, O_{RBi} ; i 時点の目的A,Bの節水時取水量
 O_{Pi} ; i 時点の計画全体取水量
 O_{Ri} ; i 時点の全体節水時取水量
 I_{Ri} ; i 時点の流入量
 S_i ; i 時点のダム貯留量
 α_i ; O_{PAi}/O_{Pi} β_i ; O_{PBi}/O_{Pi}

⑤式の目的関数を最小にする O_{RAi} 、 O_{RBi} の時系列を求めるのであるが、通常これはDPの問題となる。この場合12半旬でもめんどろな計算となり、しかも目標放流量が求まるのみで全体の節水ルールは定まらない。しかしDDCルールカーブに於て一定量の節水をする時2つの目的の最適節水率を出すことはそう困難なことではなく、一定の近似解を出すことは可能と思われる。

7. 確保水位より水位が上にある場合の運用

ダム運用上節水ばかりでなく、確保容量を上回る場合の操作ルールも必要である。例えば以下の様なラインを描いておくことで運用上有効である。

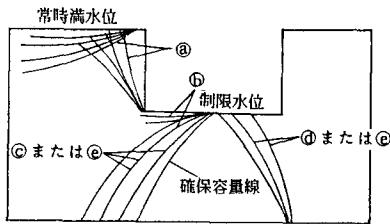


図-13 節水以外の運用ライン

②制限水位より水位が上昇し、無効放流（放流管能力より大きな、放流ゲート操作を伴う放流）が生ずるのを防ぐ。

①確保水位のピーク時に制限水位との間を通りぬける。

③渇水年も安全に水位上昇できるような目標を設ける。

④確保水位より上の水位の場合のダムの渇渇に対する可能放流量を知る。

⑤各ダムの利水容量確保時期が異なる時の容量調整

これらは各ポイントから右から左へ $V = \sum (I - O)$ （ I ：流入量、 O ：放流量、 V ：貯留量）として算出していく。これらを図

13に示す。④の線及び⑤の上側の線は大きい確率流量に対応するものであり2節の式①は以下の様に書き直される。

$$f_k(m/\tau) = k - \text{th largest} \left(\frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t_1+m-1} q(t) \right) \quad \dots\dots ⑧$$

⑤の下側の線及び③、④の線は渇水を対象としたDDCルールカーブである。それぞれのラインが放流量を変えて数本描かれる。また中間の水位には発生電力量のマスカーブから算出した操作ラインを入れることも考えられる。

あとがき

ダム群の最適運用については、理論的研究はあるが、現在のところ実際の流域で操作に用いられているものは無いに等しい。このためDDCカーブの適用を中心に、豊平川等の実流域で利用可能な操作ルール作りを進めている。ここでは、1ダムの場合のみを述べたが現在「節水の空振りの問題」や「2ダム2目的の運用」については解決の目途が立ってきつつある。しかし、ダム数が増加し、利水形態が複雑化している場合については種々の問題が予想され、これを如何に現場で利用可能な形で解決するかが、直面する課題である。

参考文献

- 1) 竹内邦良・吉川秀夫 : 渇水持続曲線法とマスカーブ法、土木学会論文報告集第303号pp53～63 1980年11月
- 2) 竹内邦良・富田 茂・伊藤幸義 : 給水用貯水池のためのDDCルールカーブ、第28回水理講演会論文集 pp21～26 1984年2月
- 3) 中安正晃・振井茂宏 : 利水安全度指標に関する研究、第28回水理講演会論文集 pp13～19 1984年2月
- 4) 渡辺和好・星 清 : 渇水持続曲線の改良、開発土木研究所月報No.24、pp15～21 1988年9月
- 5) 七澤 馨・渡辺和好・星 清 : 地域特性を考慮したダム運用ルールに関する一考察 土木試験所月報No.411、pp80～97 1987年8月
- 6) 及川正則・許士達広・工藤 喬 : ダム群の最適容量配分及び操作について、第33回北海道開発局技術研究発表会講演概要集(3) pp303～308 1990年2月