

地域特性を考慮したダム運用ルールに関する一考察

Reservoir Operating Rules Based on Regional Characteristics

七澤 馨* 渡辺和好** 星 清***

Kaoru NANASAWA, Kazuyoshi WATANABE and Kiyoshi HOSHI

水資源開発の重要性は渇水の発生のために強く認識されるが、気象変動が正常にもどってしまふと、その必要性が忘れられてしまふ傾向にある。

北海道の多くの川では融雪量は年流出量の約50%を占め、貯水池の水位も融雪期にはほぼ満水位に達する。したがって、ダム管理者は1年間のダム運用ルールに強い関心を払うことになる。

一方、積雪寒冷地における都市域では、河川自然流下量の減少と水需要の増加に伴う冬期渇水が大きな問題となりつつある。したがって、年間を通じた水利用の信頼度を測る指標の開発が必要となる。

本報告では、2つのダム運用ルールを採用し、水供給施策の信頼度を比較検討する。

《水管理の信頼度；ダム運用ルール；融雪出水》

Although the importance of water resource development has been recognized by the society during times of drought, it is difficult to maintain the impetus when the weather returns to normal.

In most rivers of Hokkaido, snowmelt runoff accounts for about 50% of annual runoff volume. Many reservoir systems in Hokkaido completely fill almost every spring, and in such cases operators of reservoirs are only concerned with the within-year operation of the system.

The drought around densely populated areas in river catchments of cold regions results from usual low natural flows and increasing water demands. Considering the above arguments, the potential advantage of developing the indices for measuring the reliability of water use throughout a year becomes apparent.

The major purpose of the current works is to investigate two operating rules (i. e., water saving rules and Drought Duration Curve rules) and to determine how reliable water supply strategy could be incorporated formally into reservoir operation.

Keywords: reliability of water use management, reservoir operating rules, snowmelt runoff.

1. はじめに

水需要量は、社会・経済の発展に伴い、大幅に増加してきた。今後も生活水準の向上などにより、水需要はさ

らに増加すると予想される。現在、わが国においては、水資源としては主に河川水が利用されている。しかしながら、河川水は降雨の多少により変動するものであり、

*前河川研究室主任研究員 現石狩川開発建設部維持管理課施設管理係長 **河川研究室員 ***同室長

水資源として供給できる量は年ごとの降雨の傾向に左右される不安定なものである。このような水需要の増加と供給の不安定さに対処するために、水資源の新規開発・安定的な供給のためのダム建設が進められているが、依然として安定的な水供給を達成していないのが現状である。このような状況のもとで、各地で渇水が発生している。また、社会活動に占める水の重要度が増しているために、一度渇水が発生した場合の被害は大きなものとなる傾向にある。新規の水資源開発が水需要に追いつかない以上、現状で渇水被害を最小限のものとするためには、既存のダムなどに確保された水資源を有効に利用しなければならない。その際に、ダムの運用の仕方により渇水被害が大きく変化することを考えれば、渇水時のダム運用の考え方を明確にすることが求められている。すなわち、渇水被害を最小限に抑えるためのダム運用ルールが、渇水への対応の中でその重要性を増している。しかしながら、渇水に対する危険性は、河川の流出特性や水需要構造といった水需給の地域特性により、地域ごとに变化するものである。したがって、ダム運用ルールを考える場合には、地域特性を反映したものでなければならない。

本報告では、地域特性を4つのタイプに類型化し、各タイプに対して2種類のルールで、過去の水文時系列に対するダム運用シミュレーションを行った。地域特性のタイプ別、ルール別にダム運用の効果（渇水被害の減少の程度）を求め、地域特性に適合したダム運用ルールを考えるものである。ここで、地域特性の類型化にあたっては、水需要特性を需要と供給に分けて考え、それらを組み合わせることとした。需要については、通年ほぼ一定の都市用水タイプ、かんがい期に集中する農業用水タイプとし、供給については、融雪期に集中するタイプ、梅雨と台風に分散するタイプとした。地域特性は、それぞれ2タイプずつある需要特性と供給特性を組合わせた4タイプとした。ダム運用ルールとしては、いくつか提案されている中から、段階節水ルール¹⁾、渇水持続曲線(Drought Duration Curve 以下DDCと略す)ルール²⁾を取りあげることにした。

2. モデル地域の選定

前節で述べたように、河川の流出特性および流域の水需要構造により地域特性を特徴づけることができる。本報告では、地域特性を次のように分類する

- I) 融雪・都市用水タイプ
- II) 融雪・農業用水タイプ
- III) 梅雨台風・都市用水タイプ

IV) 梅雨台風・農業用水タイプ

融雪・都市用水タイプとして豊平川流域を、梅雨台風・農業用水タイプとして吉野川流域をモデル地域として選定した。残りの融雪・農業用水タイプ、梅雨台風・都市用水タイプについては、豊平川流域と吉野川流域の水需要構造を、それぞれの用水タイプに合うように変換した仮想のモデル地域を作成することにした。水需要構造としては、河川の維持流量と水利権量を加え合わせた正常流量を用いることにした。

用水タイプの変換方法を、豊平川流域での都市用水の農業用水への変換を例に説明する。

- ① 豊平川の実際の正常流量の年間総量を求める。
- ② 吉野川の正常流量の年間総量に占める各旬の正常流量の比率を求める。
- ③ 吉野川での各旬ごとの比率を豊平川の正常流量の年間総量に乗じる。
- ④ 得られた値が変換された用水タイプとなる。

吉野川流域の用水タイプの変換も同様に行うことができる。表-1に各地域特性に対応するモデル地域を示す。

表-1 設定モデル地域

水需要構造 流況特性	都市用水	農業用水
	融雪集中	タイプ I 豊平川流域計画利水
梅雨台風	タイプ III 吉野川流域変更利水	タイプ IV 吉野川流域計画利水

以上で類型化された地域特性のそれぞれについて、モデル地域が設定されたことになる。図-1, 2は、それぞれ豊平川、吉野川の流出特性を示したものである。図中の縦軸には、年間総流量に占める月間総流量の比率を取っている。ただし、これらの図は、融雪タイプ、梅雨台風タイプの流出特性の特徴を示すためだけのものであり、昭和59年を例として用いている。次に水需要構造については、図-3にタイプIの、図-4にタイプIIの、図-5にタイプIIIの、図-6にタイプIVの場合をそれぞれ示す。ここで図-3, 6は、実際の豊平川、吉野川の正常流量パターンであり、図-4, 5は前述の方法で変換された正常流量パターンを示している。

融雪タイプ、梅雨台風タイプの、それぞれのモデル地域におけるダムの利水容量は、次のように考えることとした。

- ① 融雪タイプのモデル地域である豊平川流域では、既存の豊平峡ダムと建設中の定山溪ダムの利水容

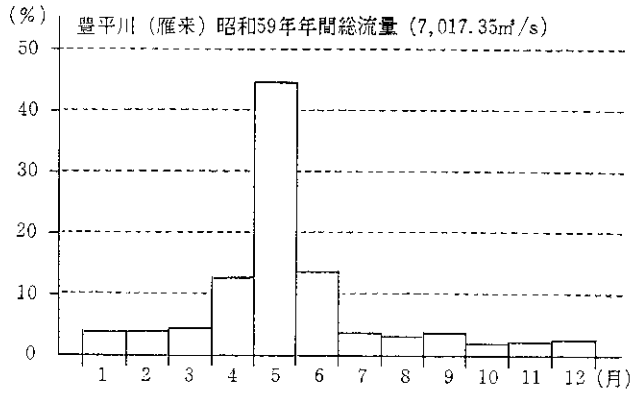


図-1 豊平川流出特性

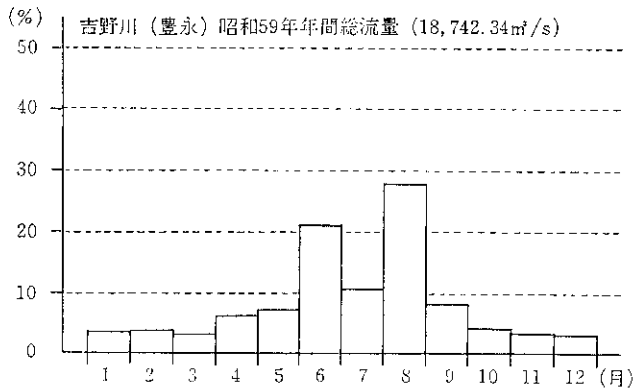


図-2 吉野川流出特性

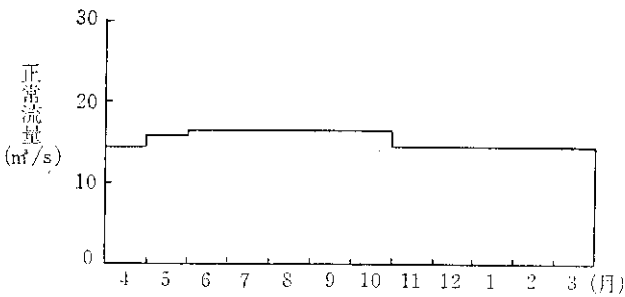


図-3 水需要構造 (タイプ I)

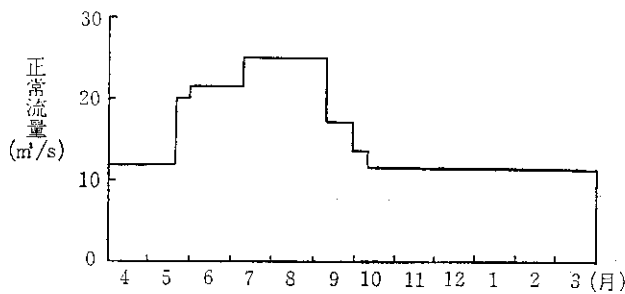


図-4 水需要構造 (タイプ II)

量を合計した仮想ダムの利水容量とする。

- ② 豊平峡ダムが制限水位方式であるので、仮想ダムにおいても季節ごとの制限水位方式による利水容量とする。

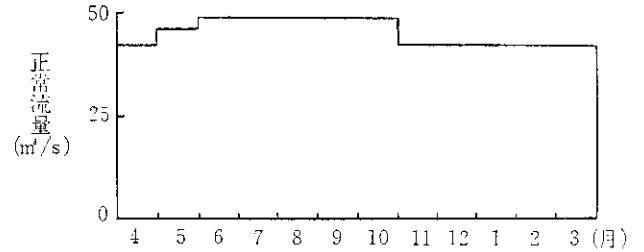


図-5 水需要構造 (タイプ III)

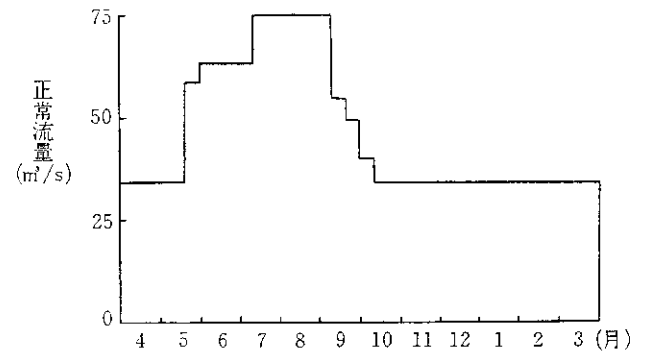


図-6 水需要構造 (タイプ IV)

表-2 モデル地域の利水容量

時 期	豊平峡・定山溪 仮想ダム		早明浦ダム	
	タイプ I	タイプ II	タイプ III	タイプ IV
1/ 1~ 6/20	96.7	96.7	173.0	173.0
6/21~ 6/30	88.6	88.6	173.0	173.0
7/ 1~ 9/30	76.5	76.5	173.0	173.0
10/ 1~10/31	88.6	88.6	173.0	173.0
11/ 1~12/31	96.7	96.7	173.0	173.0

(単位: $\times 10^6 \text{m}^3$)

- ③ 梅雨台風タイプのモデル地域である吉野川流域では、既存の早明浦ダムの利水容量とする。

表-2にそれぞれのモデル地域の利水容量をまとめて示す。ダム運用ルールの違いによる洪水被害の変化を検討するために用いた水文資料は、豊平川流域で昭和26年から昭和59年までの34年間とし、吉野川流域で昭和23年から昭和59年までの37年間とした。

3. ダム運用ルール

本報告では、ダム運用ルールとして段階節水ルールとDDCルールを取りあげることとする。段階節水ルールは、貯水池の残容量のみに着目し、今後予想されるダム流入量については考慮せずにダム運用を行うものである。これに対して、DDCルールは、ダム運用時点において、

今後の m 時間間隔内に危険率 P_k で期待できる平均ダム流入量を考慮してダム運用を行うものである。すなわち、段階節水ルールは貯水池の残容量に、DDC ルールは貯水池の残容量と今後の平均ダム流入期待量に着目したダム運用ルールである。

各ダム運用ルールには、実際の運用にあたって決定しなければならないパラメータが含まれている。すなわち、段階節水ルールの場合には、節水開始貯水量、最大節水率、各段階ごとの節水率であり、DDC ルールの場合には危険率 P_k である。これらのパラメータは、決定論的に将来のダム流入量を予測できないため、過去のダム流入量の時系列に対する運用シミュレーションで求めなければならない。すなわち、パラメータを種々変化させながら運用シミュレーションを繰返し、過去の時系列に対して渇水被害が最小となるようにパラメータを決定するものである。また、パラメータの決定に際しては、渇水被害を評価する指標が必要となる。渇水被害の評価指標としては、パンク発生日数、不足量、不足%・日、(不足%)²・日、渇水被害関数、渇水被害額などがある³⁾。ここで、パンク発生日数はダム容量がゼロとなっている日数であり、不足%は正常流量に対する不足率である。不足%・日の日は不足が発生している日数であり、渇水被害関数は、(不足%)²・日に不足量に乗じたものである。渇水被害はわずかな不足が長期間継続する場合の方が厳しいものとなる。すなわち、渇水被害は非線形の関数として表現されるべきものである。本報告では、渇水被害を評価する指標として、非線形性が最も強調される渇水被害関数を用いることにし、運用シミュレーション期間の渇水被害関数の総計が最小となるようにパラメータを決定した。運用シミュレーションを行う期間は、豊平川流域では34年間、吉野川流域では37年間とした。

以下に、段階節水ルールおよびDDCルールの考え方を述べるとともに、各ルールについて、本報告で取りあげたモデル流域での最適運用パラメータを求めた結果をまとめておく。

(1) 段階節水ルール

段階節水ルールは、貯水池の残容量に着目し、節水率を貯水量の関数として段階的に決め、渇水のインパクトを緩和しようとするルールである。実際に運用する場合、段階節水ルールにおいて決定しなければならないパラメータは、節水開始貯水量、最大節水率、各段階ごとの節水率である。節水開始貯水量は、渇水対応としての段階節水ルールにおいて最も重要な因子である。すな

わち、節水開始貯水量を大きくとり過ぎると、小さな渇水に対してもすぐ節水に入ることになり、平常時の水利用に支障をきたす。反対に節水開始貯水量を小さくし過ぎると、大きな渇水が発生した場合、貯水池がパンクする危険性が増大するからである。最大節水率は、利水者サイドで対応できる限界値とするか、あるいは貯水池が潤湿しないように選定する。各段階ごとの節水率は、最大節水率にいたるまでの間を段階節水の段階ごとに設定すればよい。ただし、節水率が急激に変化しないようにすることが肝要であり、最大節水率を段階数で除した値で順に設定する方法、最大節水率を段階数で除した値で隣合う値を平均して、各段階の節水率を設定する方法などが考えられる。

以上の節水率の設定方法を、 n 段階節水ルールとして式で表現すれば、(1)、(2)式となる。

貯水量の条件

$$\left(1 - \frac{i}{n}\right) V_a < V \leq \left(1 - \frac{i-1}{n}\right) V_a \text{ のとき}$$

方法1 (最大節水率を段階数で除した値のみを用いる方法)

$$S_i = \frac{i}{n} S_{\max} \dots\dots\dots (1)$$

方法2 (最大節水率を段階数で除した値の平均を用いる方法)

$$S_i = \frac{2i-1}{2n} S_{\max} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 n : 節水の段階数、 i : 節水段階のレベル ($i=1 \sim n$)、 V_a : 節水開始貯水量、 S_{\max} : 最大節水率、 S_i : 第 i レベルにおける節水率、 V : 貯水量。

図-7は、4段階 ($n=4$) 節水ルールでの貯水量と節水率の関係を図-7について示したものである。たとえば、貯水量 V が V_a と $0.75 \cdot V_a$ の間であれば、第1段階目

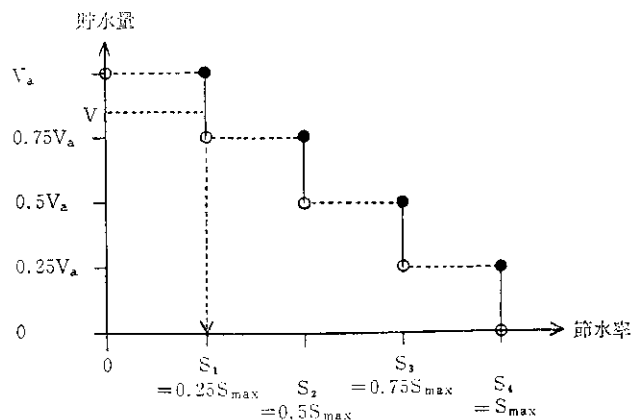


図-7 貯水量と節水率の関係

($i=1$) の節水が必要となる範囲であり、その場合の節水率は $0.25 \cdot S_{max}$ となることを示している。

方法1は、利水者の許容限界である最大節水率まで節水を行う方法であり、各節水段階レベル間の節水率のピッチは一定になる。これに対して、方法2は、最大節水率まで節水を行わない方法であり、節水なしのレベルから第1レベルへの節水率のピッチが、第2レベル以降のピッチより小さくしたものである。このため、節水開始時のインパクトが小さくなるとともに、最大節水率まで節水を行わないため利水者側にも若干の余裕を与えることができる。しかしながら、方法2では最大節水率近傍で余裕をとるために、節水期間が長くなることになる。最大節水率近傍での節水期間の長短が渇水被害に与える影響の大きさを考えると、それまでのレベルにおける節水率が多少大きくても、最大節水率近傍での節水期間を短くするべきである。本報告では、(1)式に示した節水率の設定方法を用いることにする。図-8は(1)式で設定した段階節水ルールを、豊平川流域に適用したシミュレーションの例である。図-8の上段がルールおよび貯水量を示したものであり、下段はルールに従った場合の不足%を示したものである。

(2) DDC ルール

渇水が問題となるのは、長期にわたり流量がその季節の標準値を下まわる場合である。すなわち、標準値を下まわる期間の長さとそのズレの積分値は、渇水の厳しさを示す指標となる。この指標を求めるためには、季節別

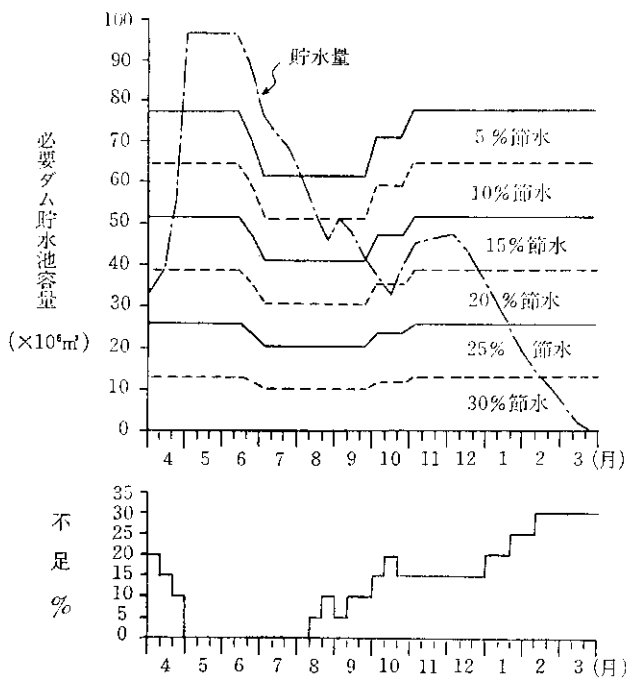


図-8 段階節水ルール

の標準値が必要となる。しかしながら、現段階においては、季節別の流量の標準値を決定論的に定めることは不可能である。そのため、過去の流量観測資料を用いた統計解析により、標準値を求めることになる。季節別 DDC とは、過去の流量観測資料について移動平均をとることにより、季節別の流量の標準値を求めるものである。すなわち、季節別 DDC は、ある季節において今後任意の m 時間間隔内に危険率 P_k で期待できる平均流量と定義される。ここで、危険率としては、求めたい標準値の非超過確率を用いることにする。以下に季節別 DDC を用いて、ダム運用のための DDC ルールの求め方を述べる。

季節別 DDC は、(3)式で求められる。

$$f_k(m|\tau) = k\text{-th smallest} \left\{ \min_{j=1,2,\dots,n} \left(\frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t_1+m-1} q_t \right) \right\}_{(j,\tau-\frac{s}{2}) \leq t_1 \leq (j,\tau+\frac{s}{2})} \dots (3)$$

ここで、 $f_k(m|\tau)$: 順序統計量の小さい方から k 番目の資料による季節別 DDC, (j, τ) : j 年目の 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, q_t : 流量, n : 流量資料のある年数。

(3)式で、() 内は j 年の t_1 時点から始まる m 時間間隔の流量の移動平均を意味しており、{ } 内は季節早遅を考慮した τ 時点における移動平均の最小を意味している。 k -th smallest { } は、 n 年間の τ 時点における移動平均の最小値を、小さい順に並べた際の小さい方から k 番目を意味している。

季節早遅の考慮期間とは、たとえ τ 時点に観測された量であっても水文事象の偶然変動により τ 時点からずれる可能性があるため、このずれを考慮するための期間である。すなわち、降雪初日や入梅雨が年ごとに変化することに対応するための期間と考えればよい。(3)式で表わされた季節別 DDC を用いて、 τ 時点からはじまる m 時間目の想定流入量は、(4)式で求められる。

$$\hat{q}_k(m|\tau) = f_k(m|\tau) \cdot m - f_k(m-1|\tau) \cdot (m-1) \dots (4)$$

ここで、 $\hat{q}_k(m|\tau)$: τ 時点からはじまる m 時間目の想定流入量。

(4)式で m 時間目の想定流入量が求められることは、図-9により考えればよい。すなわち、 $f_k(m|\tau) \cdot m$ は τ 時点から m 時間目までの、 $f_k(m-1|\tau) \cdot (m-1)$ は τ 時点から $(m-1)$ 時間目までの想定総流入量であるから、その差は m 時間目の想定流入量となり、図-9の斜線の部分を意味するものである。

DDC とは任意の危険率で期待できる平均流量であり、したがって、(3), (4)式で用いた順序統計量の小さい方か

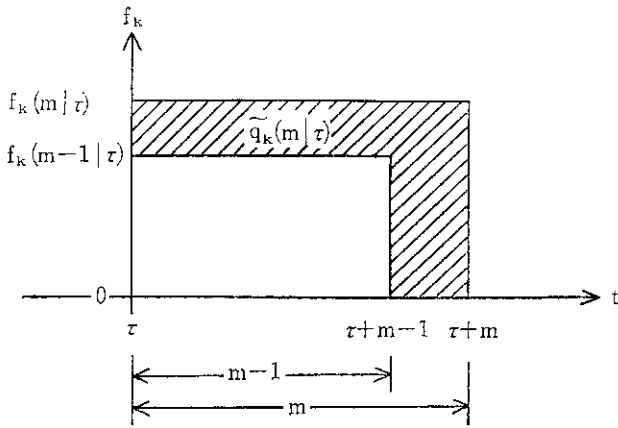


図-9 m 時間目の想定流入量

ら k 番目の資料を確率評価しなければならない。すなわち、確率評価を行わなければ、(3)、(4)式で求めた結果の意味するところが不明となり、ダム運用ルールとしての DDC ルールの妥当性が失なわれる。また、 k 番目の資料を確率評価することにより、DDC ルールの客観性を確保することができる。本報告では、確率評価を行う際のプロット・ポジションとしてワイブル公式⁴⁾を用いることとした。季節別 DDC の危険率は(5)式により求められる。

$$P_k = \frac{k}{(N - N_s) + 1} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 P_k : 危険率 (渇水確率年 $T_k = 1/P_k$)、 k : 順序統計量の小さい方からの順番、 N : 資料年数、 N_s : 渇濁を考慮する時間間隔 (単位は年)。

渇濁を考慮する時間間隔とは、貯水池が渇濁した場合の影響が及ぶ期間、すなわち渇濁した貯水池が満水になるまでに要する期間を意味している。たとえば、積雪寒冷地では夏期に渇濁したとしても春の融雪により満水まで回復するので、渇濁を考慮する時間間隔としては、1年を考えれば十分である。これに対して、融雪という確実な水補給を望めない地方においては、貯水池の渇濁の影響は長期にわたることになり、渇濁を考慮する時間間隔を最低でも1年以上とらなければならない。

以上で、DDC ルールを設定するのに必要な諸量が得られたことになる。次に、これらを用いて DDC ルールを設定する方法を述べる。DDC ルールとは任意の危険率に対して、今後 N_s 時間間隔内に貯水池が渇濁しないために、 τ 時点で確保しておかなければならない貯水量を、時点を移動させながら結んだものである。 τ 時点で確保しておかなければならない貯水量は、(6)式で与えられる。

$$V_k(\tau, \alpha) = \max_{1 \leq n \leq N_s} \left[\sum_{m=1}^n \left\{ (1-\alpha) W(m|\tau) - \tilde{q}_k(m|\tau) \right\} \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $V_k(\tau, \alpha)$: τ 時点で確保すべき貯水量、 α : 節水率、 $W(m|\tau)$: τ 時点から m 時間目の水需要量。

ただし、前段では N_s の単位を年としたが、(6)式においては τ を移動させるピッチの単位にあわせておく。たとえば、 N_s が1年の場合を考えると、 τ の移動ピッチが1旬ならば $N_s = 36$ 旬となり、移動ピッチが半旬ならば $N_s = 72$ 半旬となる。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 τ における $V_k(\tau, \alpha)$ を結んだものが DDC ルールとなる。(6)式による DDC ルール・カーブは、 α という節水率により渇水に対応する場合に、貯水池で確保すべき下限の貯水量を示すものである。すなわち、貯水量が $V_k(\tau, \alpha)$ 以下となった場合には、節水率 α での対応では貯水池がパンクする可能性がでてくる。したがって、節水率を α よりもさらに1ランク厳しいものにしなければ渇水に対応できないことになる。ルール・カーブが示す節水率の考え方を例を用いて説明する。たとえば、節水率のピッチを5%とした DDC ルールで、ある時点の貯水量が節水率10%と15%のルール・カーブの間にあったとする。この場合には節水率10%ではダムが渇濁する危険性があり、15%の節水が必要であることを示している。図-10に、DDC ルールを豊平川流域に適用したシミュレーションの例を示す。図-10も図-8と同様に、上段にルールおよび貯水量を示し、

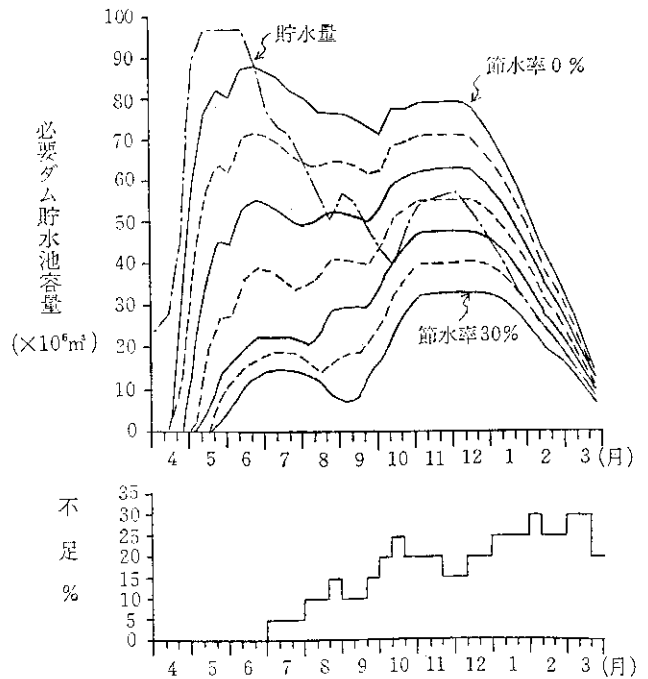


図-10 DDC ルール

下段にそのルールに従った場合の不足 % を示す。

(3) 最適運用ルール

前節までで述べた段階節水ルールと DDC ルールについて、本報告で選定した4モデル地域での最適運用ルールを求めることにする。最適運用ルールは、過去の流量資料に対するシミュレーションにおいて、渇水被害関数の総計を最小とするものとする。用いる流量資料は1旬単位とし、節水率を決定するためのリード・タイムも1旬とする。すなわち、 t 旬の節水率は $(t-1)$ 旬の貯水量により決定されるものとする。

段階節水ルールでは、最大節水率、節水開始貯水量、段階数が最適運用ルールを求める上でのパラメータとなる。ただし、本報告では節水率のピッチを5%に固定し、段階数については最大節水率を節水率ピッチで除した結果得られるものとした。また、豊平川流域と吉野川流域ではダム容量が異なるので、節水開始貯水量についても利水容量で除した無次元化した貯水率で表わすことにした。段階節水ルールについての最適運用ルールを求めるために、本報告では次のようなケースを設定した。最大節水率は、10~50%まで10%ピッチで変化させた5タイプとした。節水開始貯水率は、0~100%まで10%ピッチで変化させた11タイプとした。以上の最大節水率

と節水開始貯水率のタイプを組合わせた計55ケースの中から、各モデル地域での最適段階節水ルールを求めた。

DDC ルールでは、危険率が最適運用ルールを求める上でのパラメータとなる。本報告では、順序統計量の小さい方の第1位から第10位までの資料を用いることにした。潤渇を考慮する時間間隔については、モデル地域の内、融雪集中タイプでは融雪期に必ず満水まで貯水量が回復するので1年とし、梅雨台風タイプでは吉野川流域で回復するのに足かけ2年かかった例があるので2年とした。流量資料は豊平川流域で34年間、吉野川流域で37年間あるので、第10位までの危険率は、それぞれの流域において1/34...10/34, 1/36...10/36となる。したがって、融雪集中タイプのモデル地域の危険率は1/34...10/34であり、梅雨台風タイプのモデル地域の危険率は1/36...10/36である。また、季節早遅の考慮期間については、豊平川流域での長期積雪、降雪、吉野川流域での梅雨のそれぞれの初日および終日の変動から40日とした。この変動の状況を表-3に示す。以上の諸量により、4モデル地域に対する運用シミュレーションを行い、各モデル地域における最適 DDC ルールを求めた。

4モデル地域のそれぞれについて、渇水被害関数を最小とするという評価基準で求めた段階節水ルールおよび

表-3 季節早遅の期間

流域	気象官署	気象指標	区分	最 早	最 晩	差	統計期間
豊平川	札幌	長期積雪	初 日	S. 27. 11. 10	S. 29. 12. 14	34	S. 25~S. 60 36年間
			終 日	S. 38. 3. 15	S. 59. 4. 16	32	
		降 雪	初 日	S. 43. 10. 10	S. 37. 11. 12	32	
			終 日	S. 60. 4. 1	S. 29. 5. 10	39	
吉野川	高松	梅 雨	初 日	S. 38. 5. 4	S. 42. 6. 21	49	S. 21~S. 60 40年間
			終 日	S. 39. 7. 1	S. 29. 8. 2	33	

(差の単位：日)

表-4 パラメータ最適値

運用ルール	モデル地域	タイプ I	タイプ II	タイプ III	タイプ IV
	段階節水	節水段階数	6 段階	4 段階	4 段階
	最大節水率	30%	20%	20%	20%
	節水開始貯水率	80%	70%	100%	90%
DDC ルール	渇水確率	9 年	5 年	5 年	7 年

表-5 渇水被害関数の総計

モデル地域 運用ルール	タイプ I	タイプ II	タイプ III	タイプ IV
節水なし	7526 (1.00)	5458 (1.00)	30877 (1.00)	18724 (1.00)
段階節水ルール	2475 (0.33)	2192 (0.40)	13535 (0.44)	9855 (0.53)
DDCルール	1762 (0.23)	1898 (0.35)	11287 (0.37)	15575 (0.83)

(単位: $\times 10^3$, () 内は節水なしを1とした場合の各ルールの渇水被害関数の比率)

DDCルールの運用上のパラメータの最適値を表-4にまとめておく。

4. 地域特性を考慮したダム最適運用ルール

地域特性を類型化した各モデル地域において、節水なしの場合、最適段階節水ルールで節水した場合、最適DDCルールで節水した場合の、シミュレーション期間中の渇水被害関数の総計を表-5に示す。ここで、表-5の節水なしの場合とは、段階節水ルールにおいて節水開始貯水率0%のケースに対応する。すなわち、節水開始貯水率0%とは、ダムが渇渴した状態になってから節水を開始することを意味しており、ダムが渇渴した状態からの節水とは、ダムが渇渴するまでダム運用をまったく行わずに自然流況そのままに水利用を図った場合を示すことになるからである。次に節水なしの場合、最適段階節水ルールで節水した場合、最適DDCルールで節水した場合について、シミュレーションの全期間をとおしての水収支計算により、求めた貯水池のパンク日数および渇水被害関数を各年度ごとに分けてまとめた結果を、モデル地域のタイプIの場合を例として取りあげ、表-6に示す。表-6に示された傾向は、他のタイプのモデル地域についても同様である。すなわち、

- ① 平常の流況の場合、節水なしでダム運用すると渇水被害関数がゼロとなる。
- ② 平常の流況の場合、節水ルールを設定してダム運用を行うと渇水被害関数がゼロとならない。
- ③ 流況が渇水の状態を示す場合には、節水なしでは渇水被害関数が非常に大きくなる。

これらの点を考えると、将来の流況について、平常の状態なのか渇水の状態なのかあらかじめ予測できれば、節水なしと節水を伴うダム運用を組み合わせることにより渇水被害関数をさらに小さくできる。すなわち、将来の流況に関する情報は、非常に価値の高いものといえる⁵⁾。しかしながら、流況の将来予測は現状では不可能であり、たとえば、現在までの全期間中の流況に対して渇水

被害関数の総計が最小となるようなダム運用ルールを設定するなどの対応が、現状で行い得るダム運用ルールの限度である。その結果として、平常時においてもいくらかの節水を行うことが必要となり、ある程度のデメリットも覚悟しなければならない。したがって、ダム運用ルールを設定する場合には、各地域の特性に合致した合理的なダム運用ルールでなければならない。以下にダム運用ルールと地域特性との関係について、流出特性の面と水需要構造の面から述べることにする。

流出特性の面からみる場合には、モデル地域のタイプIとタイプIII、タイプIIとタイプIVをそれぞれ比較すればよい。また、水需要構造の面からみる場合には、モデル地域のタイプIとタイプII、タイプIIIとタイプIVをそれぞれ比較すればよい。ただし、本報告では流量、水需要ともに異なる豊平川流域と吉野川流域をモデル地域として取りあげ、それぞれの実測の水収支から渇水被害関数を求めているので、渇水被害関数の値そのものにより厳密な比較は行えない。そこで、表-5の()内に示してあるように、それぞれのタイプごとに節水なしの場合を基準として、各ダム運用ルールによる渇水被害関数の無次元化を行い、渇水被害関数の比率を求めた。以下の考察については、この比率を用いて進めることにする。

流出特性の面からのダム運用ルールについて考えてみる。はじめに、モデル地域のタイプIとタイプIIIの比較を行う。これらのタイプは、水需要が都市用水型の場合である。段階節水ルールでみると、タイプIで0.33、タイプIIIで0.44となっており、タイプIでの比率がタイプIIIより小さくなっている。また、DDCルールでみた場合も、タイプIで0.23、タイプIIIで0.37とタイプIでの比率がタイプIIIより小さくなっている。この点から考えると、流出が一時期に集中するような地域の方が、流出が一時期に集中せずに変動の大きな地域より、節水のためのダム運用の効果が高いといえる。次に各タイプごとに、段階節水ルールとDDCルール

表-6 タイプIにおけるパンク日数と
 渇水被害関数

年 度	節 水 な し		段階節水 ル ー ル		DDCルール	
	パンク 日 数	渇水被 害関数	パンク 日 数	渇水被 害関数	パンク 日 数	渇水被 害関数
S. 26	40	821	0	124	0	74
S. 27	21	97	0	153	0	32
S. 28	0	0	0	58	0	4
S. 29	0	0	0	16	0	6
S. 30	0	0	0	6	0	1
S. 31	0	0	0	33	0	2
S. 32	0	0	0	29	0	7
S. 33	0	0	0	20	0	2
S. 34	0	0	0	22	0	8
S. 35	80	1955	0	329	0	423
S. 36	0	0	0	98	0	6
S. 37	0	0	0	58	0	8
S. 38	0	0	0	20	0	1
S. 39	0	0	0	40	0	5
S. 40	0	0	0	43	0	5
S. 41	0	0	0	5	0	1
S. 42	0	0	0	33	0	29
S. 43	0	0	0	16	0	8
S. 44	0	0	0	30	0	3
S. 45	0	0	0	38	0	2
S. 46	0	0	0	22	0	2
S. 47	0	0	0	13	0	11
S. 48	0	0	0	10	0	4
S. 49	0	0	0	26	0	2
S. 50	0	0	0	20	0	1
S. 51	0	0	0	53	0	28
S. 52	0	0	0	65	0	55
S. 53	90	2422	21	496	0	565
S. 54	0	0	0	137	0	47
S. 55	0	0	0	24	0	33
S. 56	0	0	0	21	0	1
S. 57	0	0	0	36	0	24
S. 58	0	0	0	20	0	3
S. 59	70	2230	11	360	0	360

(単位 パンク日数：日，渇水被害関数 $\times 10^3$)

ルを比較すると、タイプIで0.33と0.23、タイプIIIで0.44と0.37となり、いずれのタイプでもDDCルールの方が効果が高くなっている。ただし、タイプIIIの場合は、タイプIの場合ほどには段階節水ルールとDDCルールの効果に大きな差がない。以上のタイプ別、ルール別の傾向は、水需要が農業用水型の場合であるタイプIIとタイプIVの比較においても同様である。特にタイプIVの場合には、段階節水ルールよりDDCルールの方が渇水被害関数の比率が大きくなっている。

水需要構造の面からのダム運用ルールについて考えてみる。はじめに、モデル地域のタイプIとタイプIIの比較を行う。これらのタイプは流出が融雪期に集中する場合である。段階節水ルールでみると、タイプIで0.33、タイプIIで0.40となっており、タイプIでの比率がタイプIIより小さくなっている。また、DDCルールでみた場合も、タイプIが0.23、タイプIIが0.35とタイプIでの比率がタイプIIより小さくなっている。この点から考えると、水需要が通年あまり変化しない地域の方が、水需要が一時期に集中する地域よりダム運用による節水効果が高いといえる。次に各タイプごとに、段階節水ルールとDDCルールを比較すると、タイプIで0.33と0.23、タイプIIで0.40と0.35となり、いずれのタイプでもDDCルールの方が効果が高くなっている。ただし、タイプIIの場合は、タイプIの場合ほどには段階節水ルールとDDCルールの効果に差がない。さらに、渇水被害関数そのものでみると、節水なしの場合タイプIで 7526×10^3 、タイプIIで 5458×10^3 であり、都市用水型の水需要構造の方が農業用水型より大きくなっている。すなわち、水需要の面からは節水を行わない場合、都市用水型の水需要構造の方が渇水の被害は大きくなる傾向にあり、節水のためのダム運用ルールが重要といえる。DDCルールでダム運用を行うと、タイプIの渇水被害関数がタイプIIより小さくなっており、本報告の範囲においては、DDCルールの有効性が認められる。以上のタイプ別、ルール別の傾向は、流出が梅雨台風により変化する場合のタイプIIIとタイプIVの比較においても同様である。ただし、タイプIVの場合のみDDCルールの方が段階節水ルールより効果が低くなっている。

以上の結果から、ダム運用の効果の点からは、次のようにまとめられる。

- ① 流出が梅雨台風などで変動する地域より、融雪期に集中する地域でダム運用による節水の効果が高い。
- ② 水需要の面からみた場合、都市用水型の地域にお

けるダム運用の効果は、農業用水型の地域におけるダム運用の効果より高くなっている。

- ③ タイプ I のように、流出が融雪期に集中し水需要が都市用水型の地域は、他のモデル地域に比較すると、渇水被害を低減させる上でダム運用による節水の効果が最も期待できる。
- ④ タイプ IV のように、流出が梅雨台風で変動し水需要が農業用水のように季節的に集中する地域では、ダム運用による節水の効果は認められるが、タイプ I ほどには顕著に現れない。

ダム運用ルールの違いによる効果の差については次のとおりである。

- ① 流出が融雪期に集中する地域では、季節的な流入量の変化を取入れた DDC ルールで運用する方が、段階節水で運用するよりも効果が高い。換言すれば、DDC ルールは流出のパターンが年ごとに大きく変動せず、ほぼ一定の地域において、有効なダム運用ルールといえる。
- ② 段階節水ルールは、各季節ごとに期待できる流出量を考慮せずにダム貯水量のみでダム運用を行うので、流出のパターンがほぼ一定の地域についてはダム運用効果が DDC ルールほどには現れない。しかしながら、どのような地域に対しても平均的な効果が期待できる。特に流出のパターンが一定でなく年ごとに変動する地域においては、DDC ルールよりも効果が現われることもあり得る。

現状においては、各ダム運用ルールに一長一短があり、地域特性ごとにダム運用ルールを一義的に決定することはできない。しかしながら、流出パターンがほぼ一定であり、年ごとの変動が小さい融雪集中型で、かつ同年の水需要の変動も小さい都市用水型の地域については、季節ごとの流出量を考慮した DDC ルールが適しているといえる。ただし、DDC ルールは季節ごとの流出量を考慮しているため、流出の変動の影響を大きく受けることになり、流出の変動の大きな地域に対しては、節水率を決定するためのリード・タイムなどについてさらに十分な検討が必要である。これに対して、季節ごとの流出量を考慮しない段階節水ルールは、流出の変動の影響を受けないので、どのような地域においてもある程度の効果を期待できる。ただし、段階節水ルールでは、確実な流出が見込まれる場合であっても節水を行うため、

ダム運用の効果を減少させることに注意しなければならない。

5. おわりに

本報告では、北海道のような流出が融雪期に集中する地域におけるダム運用ルールとして、DDC ルールの有効性について述べてきた。しかしながら、実際の豊平川流域や吉野川流域をモデル地域として流量や水需要量を用いたため、各モデル地域の総流出量、水需要量、水利用率などが異なっている。さらに、最適ダム運用ルールを求めるための流量データとダム運用ルールの効果を求めるための流量データとして、同一の過去の実測流量データを用いている。以上のような問題点があるために、ダム運用ルールの厳密な意味での比較を行うことはできず、定性的な比較で終わってしまった。また、DDC ルールは貯水池容量が無限大のダムを考慮しており、そのため満水時にも節水が必要となる場合もでてくる。このようなダム運用には問題がある。これは、DDC ルールの中に貯水池容量に関する情報が取込まれていないためであり、この点についての改良が必要である。

今後は、総流出量、水需要量、水利用率などの基礎的な諸量を一致させた上で、流出特性、水需要構造のみを変化させた場合のダム運用ルールと地域特性との関係を、より定量的に検討したいと考えている。あわせて、DDC ルールの中に貯水池容量に関する情報を取込み、満水時においても節水を行うような非現実的な運用を避け、より現実的なダム運用ルールとなるように改良したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 中澤式仁, 今村瑞穂, 石崎勝義, 中村 昭: 渇水時の水管理に関する計画学的研究, 土木研究所資料, 第 1508 号, 1979.
- 2) 竹内邦良, 富田 茂, 伊藤幸彦: 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, 1984.
- 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, 1984.
- 4) 水理公式集: 水文編, 土木学会, 1985.
- 5) 神田 徹, 神吉和夫, 瀬良昌憲: 利水用貯水池管理における流入量情報の価値評価とその利用, 水利科学, No. 174, 1987.

補-1 DDC ルール・カーブ作成上の留意事項

DDC ルール・カーブを作成する上で、留意しなければならない事項について以下に説明する。

1. 残流域の取扱い

ダム直下から基準点までの間に残流域が存在する場合は、残流域からの自然流入量を考慮する必要がある。基準点で確保すべき正常流量から、残流域からの自然流入量を差引いたものを計算に用いるダム放流量とする。

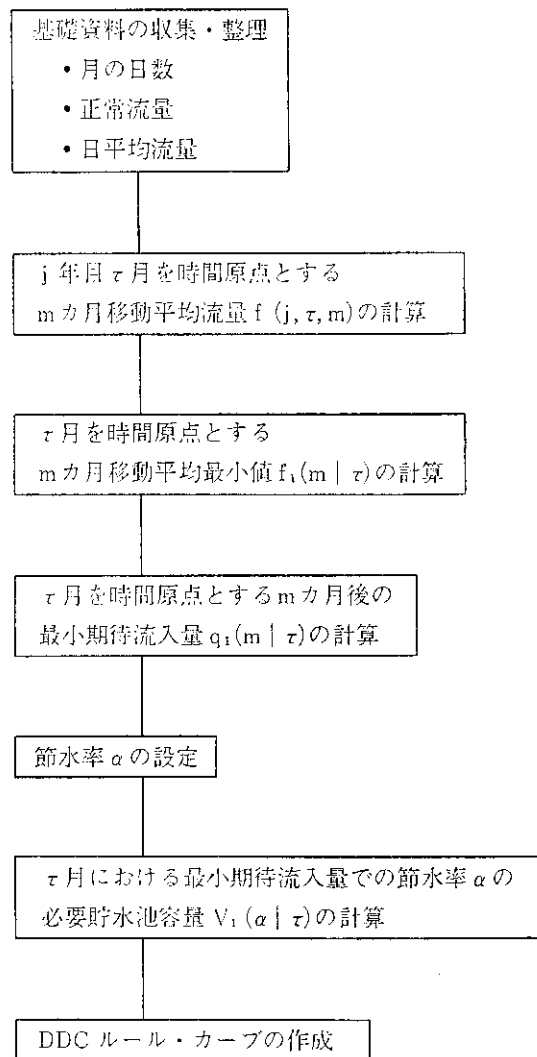
2. 節水率の取扱い

今回は、節水率 α を正常流量に乗じたものを用いて必要貯水池容量の計算を行った。ここで、正常流量は維持流量と水利権量の和である。この維持流量に節水率 α を乗じない考え方もある。その場合は、水利権量のみを節水率 α を乗じ、その上で維持流量を加えたものを正常流量としなければならない。

補-2 DDC ルール・カーブの計算例

今回検討を行った、DDC ルール・カーブの計算の流れを豊平川を例にとり説明する。計算のフローを付図-1に従って説明する。今回の計算例では、計算期間を5年間、計算単位を1カ月としている(付表-1参照)。

- ① 基礎資料として計算期間内の月の日数、正常流量、日平均流量が必要となる。
- ② 最初に j 年日 τ 月を時間原点とする m カ月移動平均流量 $f(j, \tau, m)$ を求める。 j 年日 τ 月を時間原点とする月は $4(\text{年}) \times 12(\text{カ月}) = 48$ 個、 m カ月移動平均流量は1~12カ月の12とおりでである。全部で $48 \times 12 = 576$ 個のデータが得られる。
- ③ τ 月を時間原点とする m カ月移動平均最小値 $f_1(m|\tau)$ を計算する。 τ 月を時間原点とする m カ月移動平均最小値とは、 $f(1, \tau, m), f(2, \tau, m), f(3, \tau, m), f(4, \tau, m)$ の中の最小値である。
- ④ τ 月を時間原点とする m カ月後の最小期待流入量 $q_1(m|\tau)$ を計算する。 τ 月を時間原点とする m カ月後の最小期待流入量 $q_1(m|\tau)$ は、 τ 月を時間原点とする m カ月移動平均最小値 $f_1(m|\tau)$ に m カ月を乗じたものから τ 月を時間原点とする $(m-1)$ カ月移動平均最小値 $f_1(m-1|\tau)$ に $(m-1)$ カ月を乗じたものを差引いた値である。
- ⑤ τ 月における最小期待流入量での節水率 α の必要貯水池容量 $V_1(\alpha|\tau)$ を計算する。正常流量 $W(m|\tau)$ に節水率 α を乗じたものから最小期待流入量 $q_1(m|\tau)$ を差引いたものに、月の日数を乗じたものを1~12



付図-1 計算のフローチャート

カ月の12個計算し、最大値を必要貯水池容量 $V_1(\alpha|\tau)$ とする。

- ⑥ 節水率 α における τ 月を横軸に、必要貯水池容量を縦軸にとり、各点を結んだものが、求める DDC ルール・カーブである。

1. 計算条件

- ① 対象地点
豊平川流域藻岩下基準点
- ② 水収支モデル
残流域を考慮しないで、ダム直接取水となるようなモデルとする。今回は、藻岩下基準点を仮のダムサイトとして計算する。
- ③ 計算時間単位
月単位とする。今回は簡略化のため、うるう年の影響は無視する。

付表-1 基礎資料

月	日数	正常流量	月平均流量				
			1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
4	30	14.4	40.9	50.8	32.3	51.5	61.2
5	31	15.9	115.5	78.7	90.7	74.6	101.4
6	30	16.7	51.5	24.6	35.5	27.2	33.4
7	31	16.7	13.4	17.6	25.8	9.5	21.2
8	31	16.7	7.4	10.1	13.6	15.9	17.4
9	30	16.7	22.7	12.1	15.3	23.4	19.6
10	31	16.7	14.0	22.7	19.1	22.1	34.2
11	30	14.4	16.4	23.2	15.7	19.6	27.9
12	31	14.4	9.4	8.2	20.3	14.9	16.0
1	31	14.4	6.4	5.8	7.9	7.8	8.8
2	28	14.4	5.4	4.9	6.8	6.1	6.7
3	30	14.4	6.4	6.3	8.4	15.5	8.8

④ 資料年数 (N)

昭和26年から昭和30年までの5年間の流量資料を用いて計算する。

⑤ 季節早遅の考慮期間 (s)

今回は簡略化のため、考慮しない。

⑥ 渇水を考慮する時間間隔 (Ns)

1年(12カ月)とする。

⑦ 節水率決定のリードタイム

1カ月とする。

⑧ 渇水確率年 (Tk)

順序統計量の内、最小となる系列(順序統計量の第1位)のみを対象とする。(k=1 Tk=4)

⑨ 節水率 (α)

0%のときの必要貯水容池量を求める。

2. 計算

① 基礎資料

付表-1に月別の日数 day(τ), 正常流量 W(τ) および5年間の月平均流量 q(j, τ)を示す。ここに(j, τ)はj年目のτ月を示す(年度単位となっているので、4月をτ=1とする。よって3月はτ=12となる)。

② j年目τ月を時間原点とするmカ月移動平均流量

f(j, τ, m)の計算

j年目τ月を時間原点とするmカ月移動平均流量 f(j, τ, m)は、次式で求められる。ここで、節水率決定のリードタイムを1カ月とし、貯水池の涸渇を考慮する時間間隔を1年(12カ月)としている。

$$f(j, \tau, m) = \frac{1}{m} \sum_{t=\tau+1}^{\tau+m} q_t$$

ex) 1年目(j=1), 4月(τ=1)の3カ月(m=3)移動平均は、

$$\begin{aligned} f(1, 1, 3) &= \frac{1}{3} \{q(1, 2) + q(1, 3) + q(1, 4)\} \\ &= \frac{1}{3} (115.5 + 51.5 + 13.4) \\ &= 60.1 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

1年目(j=1), 5月(τ=2)の3カ月(m=3)移動平均は、

$$\begin{aligned} f(1, 2, 3) &= \frac{1}{3} \{q(1, 3) + q(1, 4) + q(1, 5)\} \\ &= \frac{1}{3} (51.5 + 13.4 + 7.4) \\ &= 24.1 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

同様に計算を繰返せば、4年目までの計算ができる。

付表—2 (1) m カ月移動平均 (1年目)

移動平均 月	1カ月	2カ月	3カ月	4カ月	5カ月	6カ月	7カ月	8カ月	9カ月	10カ月	11カ月	12カ月
4	115.5	83.5	60.1	47.0	42.1	37.4	34.4	31.3	28.5	26.2	24.4	26.6
5	51.5	32.5	24.1	23.8	21.8	20.9	19.3	17.7	16.3	15.3	18.5	23.5
6	13.4	10.4	14.5	14.4	14.8	13.9	12.8	11.9	11.3	15.2	21.0	21.3
7	7.4	15.1	14.7	15.1	14.0	12.7	11.7	11.0	15.4	21.8	22.0	21.7
8	22.7	18.4	17.7	15.6	13.8	12.4	11.5	16.4	23.4	23.5	22.9	21.9
9	14.0	15.2	13.3	11.5	10.3	9.7	15.5	23.4	23.6	23.0	21.8	21.0
10	16.4	12.9	10.7	9.4	8.8	15.8	24.8	24.8	24.0	22.6	21.6	21.7
11	9.4	7.9	7.1	6.9	15.7	26.2	26.0	24.9	23.3	22.2	22.2	22.3
12	6.4	5.9	6.1	17.3	29.5	28.7	27.1	25.0	23.6	23.5	23.5	22.2
1	5.4	5.9	20.9	35.3	33.2	30.6	27.7	25.7	25.4	25.2	23.6	22.1
2	6.4	28.6	45.3	40.1	35.6	31.4	28.6	27.9	27.4	25.4	23.7	22.1
3	50.8	64.7	51.4	42.9	36.4	32.3	30.9	30.0	27.6	25.4	23.5	22.1

付表—2 (2) m カ月移動平均 (2年目)

移動平均 月	1カ月	2カ月	3カ月	4カ月	5カ月	6カ月	7カ月	8カ月	9カ月	10カ月	11カ月	12カ月
4	78.7	51.7	40.3	32.8	28.6	27.6	27.0	24.6	22.6	20.8	19.5	20.5
5	24.6	21.1	17.4	16.1	17.4	18.4	16.9	15.5	14.4	13.6	15.3	21.5
6	17.6	13.9	13.3	15.6	17.1	15.7	14.2	13.1	12.3	14.3	21.3	22.5
7	10.1	11.1	15.0	17.0	15.3	13.7	12.4	11.7	14.0	21.6	22.9	23.1
8	12.1	17.4	19.3	16.6	14.4	12.8	11.9	14.4	22.9	24.2	24.3	23.4
9	22.7	23.0	18.0	15.0	13.0	11.8	14.8	24.3	25.5	25.5	24.5	23.7
10	23.2	15.7	12.4	10.5	9.7	13.4	24.5	25.9	25.9	24.6	23.8	23.4
11	8.2	7.0	6.3	6.3	11.5	24.7	26.2	26.2	24.8	23.8	23.4	22.8
12	5.8	5.4	5.7	12.3	28.0	29.2	28.8	26.9	25.6	24.9	24.1	23.8
1	4.9	5.6	14.5	33.5	33.9	32.6	29.9	28.1	27.1	25.9	25.4	23.9
2	6.3	19.3	43.1	41.2	38.1	34.0	31.4	29.8	28.3	27.5	25.7	24.1
3	32.3	61.5	52.8	46.1	39.6	35.5	33.2	31.0	29.8	27.6	25.7	24.3

付表—2 (3) m カ月移動平均 (3年目)

移動平均 月	1カ月	2カ月	3カ月	4カ月	5カ月	6カ月	7カ月	8カ月	9カ月	10カ月	11カ月	12カ月
4	90.7	63.1	50.7	41.4	36.2	33.3	30.8	29.5	27.1	25.1	23.6	25.9
5	35.5	30.6	25.0	22.5	21.9	20.8	20.8	19.2	17.8	16.8	20.0	24.5
6	25.8	19.7	18.2	18.5	17.9	18.3	16.8	15.6	14.3	18.4	23.5	23.8
7	13.6	14.4	16.0	15.9	16.8	15.3	14.1	13.4	17.6	23.3	23.7	22.5
8	15.3	17.2	16.7	17.6	15.7	14.2	13.4	18.1	24.4	24.7	23.3	22.7
9	19.1	17.4	18.4	15.8	14.0	13.0	18.5	25.5	25.7	24.1	23.4	23.4
10	15.7	18.0	14.6	12.7	11.8	18.4	26.5	26.5	24.7	23.8	23.7	23.6
11	20.3	14.1	11.7	10.8	19.0	28.3	28.1	25.8	24.7	24.6	24.3	23.9
12	7.9	7.3	7.7	18.6	29.8	29.4	26.6	25.2	25.0	24.7	24.3	23.5
1	6.8	7.6	22.2	35.3	33.7	29.7	27.7	27.2	26.6	25.9	24.9	23.5
2	8.4	29.9	44.8	40.4	34.2	31.2	30.1	29.1	28.0	26.7	25.0	23.4
3	51.5	63.1	51.1	40.7	35.7	33.7	32.0	30.5	28.7	26.7	24.8	24.0

付表—2 (4) m カ月移動平均 (4年目)

移動平均 月	1カ月	2カ月	3カ月	4カ月	5カ月	6カ月	7カ月	8カ月	9カ月	10カ月	11カ月	12カ月
4	74.6	50.9	37.1	31.8	30.1	28.8	27.5	25.9	23.9	22.1	21.5	24.8
5	27.2	18.4	17.5	19.0	19.6	19.6	18.9	17.6	16.3	16.2	20.3	27.1
6	9.5	12.7	16.3	17.7	18.1	17.6	16.2	14.9	15.0	19.6	27.0	27.6
7	15.9	19.7	20.5	20.3	19.2	17.3	15.7	15.7	20.7	28.8	29.2	28.5
8	23.4	22.8	21.7	20.0	17.6	15.7	15.6	21.3	30.2	30.5	29.7	28.7
9	22.1	20.9	18.9	16.1	14.1	14.3	21.0	31.1	31.3	30.3	29.1	28.3
10	19.6	17.3	14.1	12.1	12.8	20.8	32.4	32.5	31.2	29.8	28.9	29.4
11	14.9	11.4	9.6	11.1	21.1	34.5	34.3	32.7	31.0	29.9	30.2	30.0
12	7.8	7.0	9.8	22.6	38.4	37.6	35.2	33.0	31.5	31.8	31.4	30.1
1	6.1	10.8	27.6	46.1	43.5	39.8	36.6	34.5	34.4	33.8	32.2	30.2
2	15.5	38.4	59.4	52.9	46.5	41.7	38.5	38.0	36.9	34.8	32.1	30.3
3	61.2	81.3	65.3	54.3	46.9	42.4	41.2	39.5	36.9	34.1	31.6	29.7

5年目についてはすべての月に対して12カ月後までの移動平均が計算できないので、削除する(たとえば、5年目の12月から始まる移動平均は最大3カ月までしか計算できない)。そのため、 $j=1\sim 4$, $\tau=1\sim 12$, $m=1\sim 12$ の $4\times 12\times 12=576$ 個のデータが得られる。計算結果を付表-2に示す。

③ τ 月を時間原点とする m カ月移動平均最小値 $f_1(m|\tau)$ の計算

τ 月を時間原点とする m カ月移動平均最小値 $f_1(m|\tau)$ は、次式から求まる。

$$f_1(m|\tau) = \min_{j=1,2,3,4} [f(j, \tau, m)]$$

ここでは、前節で求めた $f(j, \tau, m)$ を用いる。よって、 $j=1\sim 4$ の4個の内の最小値を求めることとなる。

ex) 4月 ($\tau=1$) の3カ月 ($m=3$) 移動平均の最小値は、

$$\begin{aligned} f_1(3|1) &= \min [f(1, 1, 3), f(2, 1, 3), f(3, 1, 3), f(4, 1, 3)] \\ &= \min [60.1, 40.3, 50.7, 37.1] \\ &= 37.1 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

5月 ($\tau=2$) の3カ月 ($m=3$) 移動平均の最小値は、

$$\begin{aligned} f_1(3|2) &= \min [f(1, 2, 3), f(2, 2, 3), f(3, 2, 3), f(4, 2, 3)] \\ &= \min [24.1, 17.4, 25.0, 17.5] \\ &= 17.4 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

計算結果を付表-3に示す。

④ τ 月を時間原点とする m カ月後の最小期待流入量 $q_1(m|\tau)$ の計算

τ 月を時間原点とする m カ月後の最小期待流入量 $q_1(m|\tau)$ は、前節の $f_1(m|\tau)$ を用いて次式で求まる。

$$q_1(m|\tau) = f_1(m|\tau) \cdot m - f_1(m-1|\tau) \cdot (m-1)$$

ex) 4月 ($\tau=1$) 時点での3カ月後 ($m=3$) の最小期待流入量は、

$$\begin{aligned} q_1(3|1) &= f_1(3|1) \cdot 3 - f_1(2|1) \cdot 2 \\ &= 37.1 \cdot 3 - 50.9 \cdot 2 \\ &= 9.5 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

5月 ($\tau=2$) 時点での3カ月後 ($m=3$) の最小期待流入量は、

$$\begin{aligned} q_1(3|2) &= f_1(3|2) \cdot 3 - f_1(2|2) \cdot 2 \\ &= 17.4 \cdot 3 - 18.4 \cdot 2 \\ &= 15.4 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$\tau=1\sim 12$, $m=1\sim 12$ の $12\times 12=144$ 個のデータが得られる。計算結果を付表-4に示す。

⑤ τ 月における最小期待流入量での節水率 α の必要貯水池容量 $V_1(\alpha|\tau)$ の計算

τ 月における最小期待流入量での節水率 α の必要貯水池容量 $V_1(\alpha|\tau)$ は、前節で求めた $q_1(m|\tau)$ と表-1の正常

付表-3 m カ月移動平均 (最小値)

移動平均月	1カ月	2カ月	3カ月	4カ月	5カ月	6カ月	7カ月	8カ月	9カ月	10カ月	11カ月	12カ月
4	74.6	50.9	37.1	31.8	28.6	27.6	27.0	24.6	22.6	20.8	19.5	20.5
5	24.6	18.4	17.4	16.1	17.4	18.4	16.9	15.5	14.4	13.6	15.3	21.5
6	9.5	10.4	13.3	14.4	14.8	13.9	12.8	11.9	11.3	14.3	21.0	21.3
7	7.4	11.1	14.7	15.1	14.0	12.7	11.7	11.0	14.0	21.6	22.0	21.7
8	12.1	17.2	16.7	15.6	13.8	12.4	11.5	14.4	22.9	23.5	22.9	21.9
9	14.0	15.2	13.3	11.5	10.3	9.7	14.8	23.4	23.6	23.0	21.8	21.0
10	15.7	12.9	10.7	9.4	8.8	13.4	24.5	24.8	24.0	22.6	21.6	21.7
11	8.2	7.0	6.3	6.3	11.5	24.7	26.0	24.9	23.3	22.2	22.2	22.3
12	5.8	5.4	5.7	12.3	28.0	28.7	26.6	25.0	23.6	23.5	23.5	22.2
1	4.9	5.6	14.5	33.5	33.2	29.7	27.7	25.7	25.4	25.2	23.6	22.1
2	6.3	19.3	43.1	40.1	34.2	31.2	28.6	27.9	27.4	25.4	23.7	22.1
3	32.3	61.5	51.1	40.7	35.7	32.3	30.9	30.0	27.6	25.4	23.5	22.1

付表—4 m カ月後流入量期待値

m カ月後 月	1 カ月	2 カ月	3 カ月	4 カ月	5 カ月	6 カ月	7 カ月	8 カ月	9 カ月	10 カ月	11 カ月	12 カ月
4	74.6	27.2	9.5	15.9	15.9	22.7	23.2	8.2	5.8	4.9	6.3	32.3
5	24.6	12.1	15.6	12.1	22.7	23.2	8.2	5.8	4.9	6.3	32.3	90.7
6	9.5	11.3	19.0	17.7	16.4	9.4	6.4	5.4	6.4	41.7	87.8	24.6
7	7.4	14.8	21.9	16.4	9.4	6.4	5.4	6.4	37.5	90.7	25.9	17.6
8	12.1	22.3	15.7	12.4	6.4	5.4	6.4	34.8	90.7	28.6	17.6	10.1
9	14.0	16.4	9.4	6.4	5.4	6.4	45.4	84.1	24.6	17.6	10.1	12.1
10	15.7	10.1	6.4	5.4	6.4	36.7	90.7	26.7	17.6	10.1	12.1	22.7
11	8.2	5.8	4.9	6.3	32.3	90.7	33.5	17.6	10.1	12.1	22.7	23.2
12	5.8	4.9	6.3	32.3	90.7	32.3	13.6	14.1	12.1	22.7	23.2	8.2
1	4.9	6.3	32.3	90.7	31.7	12.1	15.6	12.1	22.7	23.2	8.2	5.8
2	6.3	32.3	90.7	31.2	10.7	15.9	13.2	22.7	23.2	8.2	5.8	4.9
3	32.3	90.7	30.3	9.5	15.9	15.2	22.7	23.2	8.2	5.8	4.9	6.3

流量 $W(m|\tau)$ から、次式で求まる。

$$V_1(\alpha|\tau) = \max_{1 \leq N_s \leq N_s} \left[\sum_{m=1}^n \left\{ (1-\alpha) \cdot W(m+1|\tau) - q_1(m|\tau) \right\} \cdot \text{day}(m+1|\tau) \right]$$

ここで、正常流量 $W(m|\tau)$ の m が $m+1$ となっているのは、最小期待流入量 $q_1(m|\tau)$ が1カ月のリードタイムを有しているためである。すなわち、 $\tau=1$ のときは4月ではなく5月の最小期待流入量を示しているの、正常流量は $m+1$ とならなければならない。

ex) 5月 ($\tau=2$) における節水率0% の場合の必要貯水池容量

ここで、貯水池の涸渇を考慮する期間は12カ月 ($N_s=12$) である。

よって、

$$V_1(\alpha|\tau) = \max_{1 \leq N_s \leq 12} \left[\sum_{m=1}^n \left\{ W(m+1|\tau) - q_1(m|\tau) \right\} \cdot \text{day}(m+1|\tau) \right]$$

となる。

$n=1$

$$V_{1,1}(0|2) = \{W(2|2) - q_1(1|2)\} \cdot \text{day}(2|2)$$

$$= (16.7 - 24.6) \cdot 30 \\ = -237.0 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n=2$

$$V_{1,2}(0|2) = V_{1,1}(0|2) + \{W(3|2) - q_1(2|2)\} \cdot \text{day}(3|2) \\ = -237.0 + (16.7 - 12.1) \cdot 31 \\ = -94.4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n=3$

$$V_{1,3}(0|2) = V_{1,2}(0|2) + \{W(4|2) - q_1(3|2)\} \cdot \text{day}(4|2) \\ = -94.4 + (16.7 - 15.6) \cdot 31 \\ = -60.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n=4$

$$V_{1,4}(0|2) = V_{1,3}(0|2) + \{W(5|2) - q_1(4|2)\} \cdot \text{day}(5|2) \\ = -60.3 + (16.7 - 12.7) \cdot 30 \\ = 77.7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n=5$

$$V_{1,5}(0|2) = V_{1,4}(0|2) + \{W(6|2) - q_1(5|2)\} \cdot \text{day}(6|2) \\ = 77.7 + (16.7 - 22.7) \cdot 31 \\ = -108.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n=6$

$$V_{1,6}(0|2) = V_{1,5}(0|2) + \{W(7|2) - q_1(6|2)\} \cdot \text{day}(7|2) \\ = -108.3 + (14.4 - 23.2) \cdot 30 \\ = -372.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

付表-5 各節水率における必要水池容量

月	節水率	0%	10%	20%	30%	40%
4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5		52.151	11.288	0.000	0.000	0.000
6		97.943	61.409	24.875	6.910	1.393
7		88.741	56.680	24.619	11.490	7.017
8		63.539	35.950	8.362	0.000	0.000
9		80.067	56.807	33.547	10.288	0.000
10		72.775	53.988	35.201	16.414	0.000
11		84.318	69.263	54.209	39.155	24.100
12		67.712	56.514	45.317	34.119	22.922
1		44.677	37.337	29.996	22.656	15.315
2		21.695	17.838	13.981	10.124	6.267
3		0.000	0.000	000.0	0.000	0.000

$n = 7$

$$V_{1,7}(0|2) = V_{1,6}(0|2) + \{W(8|2) - q_1(7|2)\} \cdot \text{day}(8|2)$$

$$= -372.3 + (14.4 - 8.2) \cdot 31$$

$$= -180.1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n = 8$

$$V_{1,8}(0|2) = V_{1,7}(0|2) + \{W(9|2) - q_1(8|2)\} \cdot \text{day}(9|2)$$

$$= -180.1 + (14.4 - 5.8) \cdot 31$$

$$= 85.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n = 9$

$$V_{1,9}(0|2) = V_{1,8}(0|2) + \{W(10|2) - q_1(9|2)\} \cdot \text{day}(10|2)$$

$$= 86.5 + (14.4 - 4.9) \cdot 28$$

$$= 352.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n = 10$

$$V_{1,10}(0|2) = V_{1,9}(0|2) + \{W(11|2) - q_1(10|2)\} \cdot \text{day}(11|2)$$

$$= 352.5 + (14.4 - 6.3) \cdot 31$$

$$= 603.6 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n = 11$

$$V_{1,11}(0|2) = V_{1,10}(0|2) + \{W(12|2) - q_1(11|2)\} \cdot \text{day}(12|2)$$

$$= 603.6 + (14.4 - 32.3) \cdot 30$$

$$= 66.6 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

$n = 12$

$$V_{1,12}(0|2) = V_{1,11}(0|2) + \{W(1|2) - q_1(12|2)\} \cdot \text{day}(1|2)$$

$$= 66.6 + (15.9 - 90.7) \cdot 31$$

$$= -2252.2 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

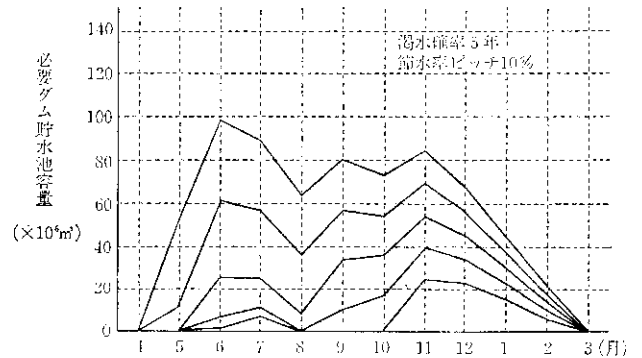
したがって、節水率0%の場合の必要貯水池容量は、次式で計算される。

$$V_1(0|2) = \max[V_{1,1}(0|2), V_{1,2}(0|2), V_{1,3}(0|2), \dots, V_{1,12}(0|2)]$$

$$= \max[-237.0, -94.4, -60.3, -77.7, -108.3, -372.3, -180.1, 86.5, 352.5, 603.6, 66.6, -2252.2]$$

$$= 603.6 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$$

容量に変換すれば、 $603.6 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{日} \times 86400 \text{ s}/\text{日} = 52,151,040 \text{ m}^3$ となる。計算結果を付表-5に示す。



付図-2 DDC ルール・カーブの一例

ここで、 $V_{1,j}$ が負となっているのは、正常流量より最小期待流入量が多いということを意味している。

節水率 α を考慮するときは、正常流量に $(1-\alpha)$ を乗じて必要貯水池容量を同様に計算すればよい。また、順序統計量の内、小さい方から2番目、3番目と計算していけば、渇水確率年を小さくしたときのルール・カーブ

を描くことができる。

付図-2は、節水率 α を0%、10%、20%、30%、40%のときのDDCルール・カーブである。横軸が月、縦軸が必要ダム貯水池容量を示してある。図中の線は上から節水率 α を0%、10%、20%、03%、40%としたものである。

*

*

*