

給水用貯水池のための DDC ルール・カーブ

DDC Rule Curve for Operating Water Supply Reservoirs

山梨大学工学部 正員 竹内 邦良

山梨大学大学院 学生員 富田 茂

山梨大学大学院 学生員 伊藤 幸義

1 はじめに

渇水持続曲線を用いた渇水時の貯水池管理の方法としては、渇水期間中に、全期間を通じての総合的な渇水の深刻さの度合を、水文・気象状況の変化に応じて逐次見なおし、最新の予想に合わせて管理の規準となる対象確率渇水年を選択・更新していく方法を提案している(竹内・吉川、1979)。この方法は、水文・気象の状況の変化に adaptive に対応するという点で合理的なものであるが、対象確率年の選択・更新に客観的規準を設定できないため、機械的な管理ルールが要望される場合には不適當である。

そこで今回は、同じく渇水持続曲線により貯水池を管理するものであるが、対象確率年の選択は唯一回で済まし、ルール・カーブの形で操作に利用することの出来る現実的な方法を提案する。

これを以下 DDC ルール・カーブと名づける。

2 DDCルール・カーブ利用上の基本方針・適用条件

DDC ルール・カーブは、経験則が立脚している技術的判断のうち以下のものを可として基本方針とし、それに従って渇水持続曲線を利用して作成した貯水池操作方法である。

- 1) 気象予測の技術は、渇水時の貯水池操作に利用できる段階に達していない。したがって過去の観測データにもとづいて将来に備える方法をとる。観測データは季節別渇水持続曲線の形で用いる。
- 2) 水資源という多目的大規模システムの包括的管理ではなく、給水目的での貯水池の操作の問題に限定して扱う。
- 3) 評価関数に妥当な経済尺度を見出すことはむづかしく、物理的な制約条件を満たすことを目標とする。その制約条件としては貯水池のこ渇確率を一定に保つという条件を選ぶ。
- 4) 操作ルールはルール・カーブの形で定める。

以上の基本方針にもとづいて、本論文では次のような条件をそなえた貯水池群をもつ給水システムを対象として管理方法を提案する。

- 5) 複数の貯水池が給水を目的として集中管理されている。貯水池以外の水源として、河川水、地下水などがある場合でも、後述の季節別渇水持続曲線の形でその統計値が与えられている。
- 6) 給水目的の中には都市上水道のほか、農業用水、工業用水、不特定維持用水も含まれているが、給水制限を実施する場合の、各用水間相互の制限率の関係は、各時点毎に協定が成立している。(例えば6月中旬にあっては、都市上水を10%制限するときには農業用水は25%制限するなどというように。) (established internal allocation)
- 7) 渇水期にあって貯水量に不足のみられるときには、全貯水池の水を合計量として運用することができる。すなわち貯水池は複数個であっても、全貯水量が1つの貯水池にあるものとして扱うことができる。(consolidated single reservoir)

以下1)、3)に掲げた季節別渇水持続曲線、貯水池のこ渇確率一定の原則について詳述する。

3 季節別渇水持続曲線(seasonal DDC)

渇水持続曲線については吉川・竹内(1975)他で定義したとおり、任意の m 日区間に、危険率 P_k で期

待できる平均流量を示すものである。危険率としては非超過確率（すなわちある水準以下になる確率）を用いる。任意の m 日区間といっても水文事象である限り気候学的変動は確実に存在することを考慮して、どの時点から始まる m 日区間であるかを特定し、以下のように定義した。

$$f_k(m|\tau) = k\text{-th smallest.} \min_{j=1, \dots, N(j, \tau - \frac{s}{2}) \leq t_1 \leq (j, \tau + \frac{s}{2})} \frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t_1+m-1} q_t \quad (1)$$

ここに (j, τ) は j 年目の τ 時点を表わす。また s は季節早遅の考慮期間である。この季節早遅の考慮期間 s は、歴史上では τ 時点から $\pm s/2$ ずれて始まった m 日間であっても、偶然変動によっては τ 時点から始まるものでもあり得たとすることのできる期間長である。実際例えば福岡における 1950~80 年の平均では、降霜の初日は 11 月 25 日、終日は 4 月 1 日であるが、早霜は 10 月 21 日、晩霜は 5 月 11 日の記録があり、季節が 1 ヶ月程度前後することは十分あることがわかる。

季節別渇水持続曲線を流入量の想定に用いる方法は次のとおりである。 τ 時点よりはじまる第 m 日目の、危険率 P_k （あるいは確率渇水年 $T_k = 1/P_k$ ）での流入量の想定量を $\hat{q}_k(m|\tau)$ とすると、

$$\hat{q}(m|\tau) = f_k(m|\tau) \cdot m - f_k(m-1|\tau) \cdot (m-1) \quad (2)$$

4 貯水池のご渇確率一定の原則

貯水池の操作方法の決定規準として、経済的評価関数を用いることが現実には難しいことは異論のないところであるが、それに代わる規準はない。そこで本論文では最適ということにとらわれない操作方法決定の規準として、貯水池のご渇確率を一定に保つという規準を選んだ。その理由は以下の通りである。

- 1) 貯水池がご渇することは、現実の経済的影響とは別に、社会不安・心理上のパニックに通じるものであり、万難を排して避けなければならない。
- 2) にもかかわらず貯水池の水を使用する限り、自然条件のいかんではご渇は避けられない。しかも現在の利水利益と、将来のご渇状態の生起確率低下による安全性とは競合関係にある。（conflict between current benefit and future safety）
- 3) したがって経済評価を行わずに競合関係を裁定する規準としては、貯水量のいかんにかかわらず、ご渇に至る確率距離を常時等しく保つというのが妥当と考えられる。（equi-probabilistic distance to exhaustion）
- 4) 給水制限という社会的衝撃を急激に与えるべきでないという要請は、渇水被害が制限率に線型か非線型かとは別の、より根源的なものである。ご渇に至る確率を等しく保つという規準では、貯水池に余裕のある時期から給水制限に入るため、昨日まで 100% 給水していたのにきょうからは半分も給水できないというような shock の強い操作は自動的に避けられる。

以上のようにこの方式は、パニック状態の生起確率を費用とのバランスの上最少にすること、shock absorber を用意することという、パニックに対する社会の一般的対応原理にもかなうものである。

5 DDCルール・カーブの描き方

T_k 年渇水時の予想流入量は (2) 式で与えられる。 τ 時点を目として第 m 日目の水需要を $D(m|\tau)$ とすれば、給水制限率を α とする限り、 T_k 年渇水でも今後 N_s 時間々隔内に貯水池がご渇しないためには、現時点で、

$$V_k(\tau|\alpha) = \max_{1 \leq n \leq N_s} \min_{m=1}^n \{ (1-\alpha) \cdot D(m|\tau) - \hat{q}(m|\tau) \} \quad (3)$$

だけの貯水量を保持していればよい。したがってこれが、ご渇確率 $P_k = 1/T_k$ を維持するために必要な給水制限率 α を指示するルール・カーブである。

選択されたこ渴確率 P_k に対して、各時点 τ に対し、 α をパラメータとして $V_k(\tau|\alpha)$ を結べば、ルール・カーブが描かれる。

6 1978年福岡渇水のシミュレーション^註

福岡市は1978年、かつて日本のどの都市も経験したことのない厳しい渇水に見舞われ、深刻な被害を受けた。そこでかりにこのとき、DDCルール・カーブを貯水池操作に用いていたとすると、どのような事態になっていたかをシミュレーションすることによって、DDCルール・カーブの実用性をチェックすることとした。しかしながらシミュレーションの条件を当時の実際と類似させることは極めてむづかしく、十分な努力は払ったものの、なお厳密な意味では以下の比較は傾向を示すものにすぎない。実際の条件に近づけるため留意した点は次のようなものである。

- 1) ルール・カーブ算出用の流量データとしては1957～76年までの20年間の半月流量を用いた。これは各貯水池への流入量を、日雨量からタンクモデルでシミュレーションしたものである。
- 2) 貯水量、貯水池への流入量、放流量は福岡市が上水用に確保している全貯水池の合計量で扱った。夏季制限水位、灌がい用水優先も考慮した。
- 3) 河川自流からの取水についても市の全量を合計値とした。その値としては当時の取水容量の限界である18万 m^3 /日を用いた。これは常時においてこれを下廻ることはほとんどなかったからである。
- 4) 水需要としては1977年の市の月別実績値を用いた。
- 5) 季節早遅の考慮期間としては $s = 2$ ケ月を用いた。
- 6) 確率渇水年としては $T_k = 20$ 年を用いた。
- 7) こ渴に至るか否かは今後3年以内という条件で $N_s = 3$ 年で算出した。
- 8) ルール・カーブは半月毎に算出して日単位に補間した。シミュレーションは日単位で行なった。
- 9) シミュレーション期間は1977年1月1日から1979年3月31日とした。この間の1978～79年の貯水池への流入量、河川自流からの取水量は、実績どおりのものを用いた。但し貯水池への流入量としては、実際の流入量から農業用放流量を差し引いた給水用貯水池分の流入量を用いた。
- 10) 給水制限率としては市の発表した名目ではなく、1977年の需要水準に対する現実の浄水場取水量を当時の実際とした。

得られたDDCルール・カーブは図1に示すとおりである。給水制限率5%毎に描いてある。以下にその特徴を述べる。

- 1) 5月までは将来の流入量が期待出来るから貯水量は少なくても良いが、6月～10月頃は少なくとも、1000万 m^3 程度の貯水量がない限り、10～20%の給水制限は避けられないことがわかる。といってもこれは河川自流からの取水を除いた貯水池からの補給分に対する制限率であるから、実際にはより小さい制限率になる。
- 2) 当時の福岡市の貯水池では、7月かりに給水用容量一っぱいの貯水量があっても、将来のこ渴確率を $\frac{1}{20}$ に抑えた上で1977年当時の需要に応じることはできない状態であった。すなわち福岡では夏期は毎年必ず給水制限をせねばならない状態であったことがわかる。

次にシミュレーション結果として図2～4を示す。図2はDDCルール・カーブに従った場合の1977年1月～79年3月までの貯水量の変化を当時の実際と比較したものである。ここでは2つのことがわかる。

(注) この結果は第38回土木学会年次学術講演会(竹内・富田、1983)で発表したものと異なっている。そこでは、(1)シミュレーションの条件が当時の実際を十分反映していない。(2)DDCルール・カーブの作成にシミュレーションによるテスト期間である1977～79年のデータを用いたため、実用性の検証実験にならなかった。

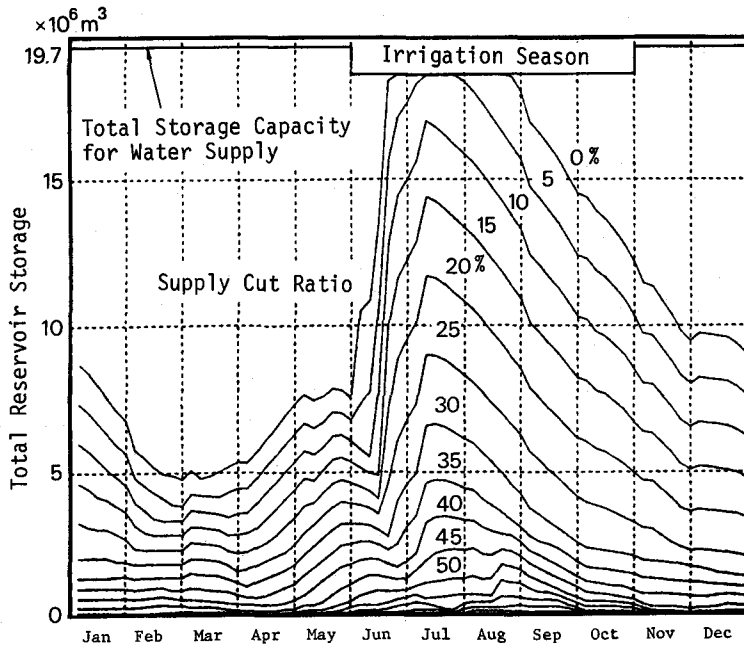


Fig.1 DDC Rule Curve for 20 Year Drought
for Fukuoka Water Supply Reservoirs.

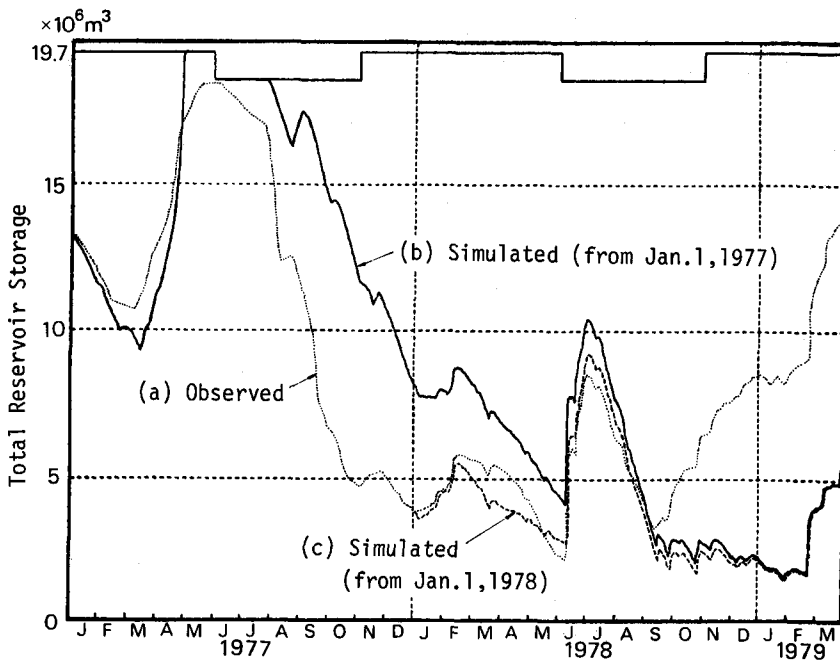


Fig.2 Temporal Changes of Reservoir Storages during the Drought.

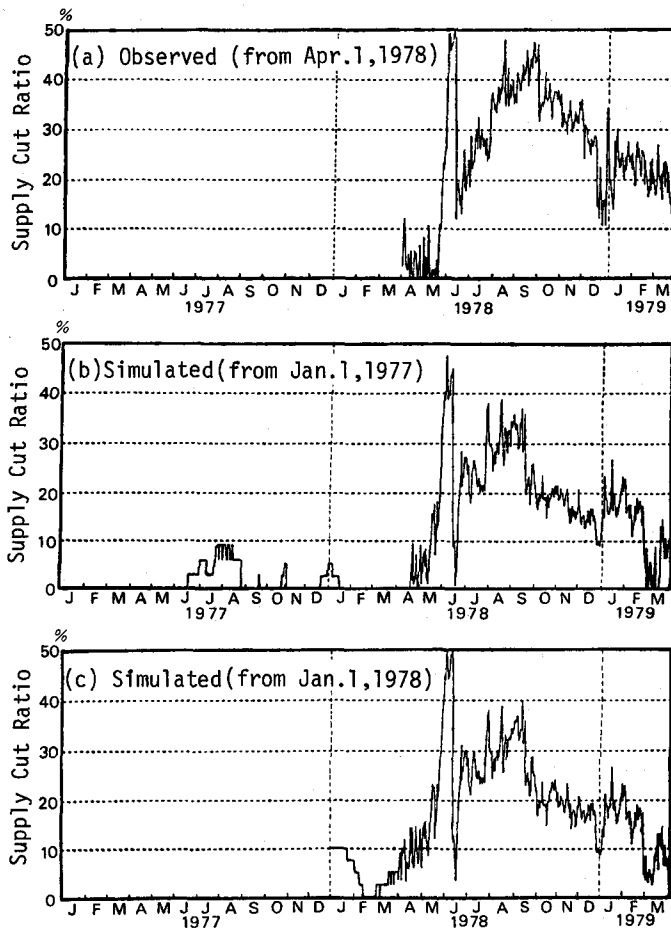


Fig.3 Supply Cut Ratios during the Drought.

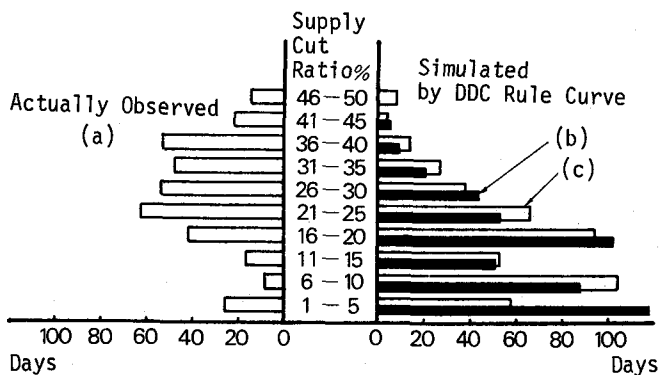


Fig.4 Frequency Distribution of Supply Cut Ratios during the Drought.

(注) 図2～4に示したシミュレーション結果のうち、1978年1月1日から始まるものは、本論文執筆終了後に追加したものである。

- 3) 実際の場合より早く給水制限に入るが、その反面かなり貯水量が減少してもあまりあわてて制限強化を行わず低水位にあまんじる。すなわち1978年6月までは実際より貯水量のリザーブが多いが、7月以後は実際より大幅に少なく、200万 m^3 前後となって、しかもその状態が半年も継続している。
- 4) このことは福岡市の水道管理者の対応は、結果的には、6月まではこ渴状態への確率距離をかなりせばめ、その後は十分な距離を取って安全を図ったということになる。したがってこ渴への確率距離でみる限り、対応は極めて常識的なものであったと言える。

図3、4は給水制限率がどうなるかをDDCルール・カーブの場合と当時の実際を比較したものである。

- 5) この図からもDDCルール・カーブでは、実際よりも早目に給水制限に入り、高い制限率が少なくなることがわかる。これがDDCルール・カーブの最大の特徴であり、実用性を保障するものである。
- 6) 給水制限の度合を%・dayで見ると、DDCルール・カーブを用いれば、当時の実際よりも約30%緩やかな制限で済みますことが出来たことになる。但し図3からわかるようにDDCルール・カーブでは1979年3月31日以降も制限が継続すると見られるので、その後も考慮しなければ正しい比較とは言えない。

7 結論および今後の課題

以上より、DDCルール・カーブは現状においてすでに即実用に供し得る具体性を備えており、またそのperformanceは十分信頼出来るものであると結論することが出来る。然しながらさらにその実用性を高めるために、今後さらに検討すべき課題として次の3点を挙げておく。

- 1) s 、 T_k の適切な選択のための調査・検討。
- 2) 給水制限率が日毎に変動するのは好ましくない。また、給水制限が緩和された後再び強化されるのは社会的に不安定な影響を及ぼす。これ等をなるべく避ける方策を講じるべきである。
- 3) こ渴に至る確率にも、約半月後にこ渴するのと1年後にこ渴するのでは N_g 期間(3年)内にこ渴する累加確率としては、同じであっても実質的確率距離が同等とは判定し難い。したがって今後1ヶ月内、2ヶ月内等にこ渴する確率をも考慮して *equi-probabilistic distance to exhaustion* とする方式を見つけるべきである。

謝 辞

本研究に当っては、福岡市水資源対策担当の岩熊健氏より貴重な資料を提供していただくとともに、多くの助言を賜った。また財政的には昭和56・57年度文部省科学研究費補助金、一般研究(C)、課題番号5655047の援助を得た。記して深甚なる謝意を表する。

引用文献

1. 吉川・竹内、渇水持続曲線の性質とその応用、土木学会論文報告集、No. 234、1975、pp. 61~71
2. 竹内・吉川、渇水持続曲線法実用化のための検討と応用例第23回水理講演会論文集、1979、pp. 257~262
3. 竹内・富田、DDCルール・カーブによる給水用貯水池の管理、第38回土木学会年次学術講演概要集、1983、pp. 151~152