

渇水持続曲線を用いたダムの利水運用について

A Study of Dam Control with DDC Rule Curve

許士達広* 下田明** 渡辺和好***

By Tatsuhiro Kyoshi, Akira Shimoda
and Kazuyoshi Watanabe

This paper presents the methodology to obtain optimal reservoir operation for water supply by use of Drought Duration Curve (DDC rule curve). Optimum DDC rule curve is chosen in comparison with drought safety indices. New method named Staged DDC rule curve is adapted to lessen the possibility of reservoir exhaustion and excessive water saving. Inflow forecasting can be incorporated with DDC rule curve for the improvement of reservoir operation.

Key Words ; Dam Control, DDC Rule Curve, Staged DDC Rule Curve

1. まえがき

近年渇水が頻繁に生じており、ダムの最適利水運用についての問題点が改めて提起されている。これについてはDP等の計算によるものや、ファジィ理論を用いるものなどの研究がなされてきているが、多目的ダム等における実用化には至っていない。渇水持続曲線(DDCルールカーブ)は、その取り扱いが比較的容易であり有効性が確認されているが、以下のような問題が残されている。

- 1) ダムの利水容量が定められた場合の最適渇水持続曲線の描き方を定める必要がある。
- 2) 貯水池が満水に近く結果的に渇水に程遠い場合でも、渇水持続曲線による確保容量をわれば節水してしまうため、対策が必要である。(節水の空振り)
- 3) ダムが涸渇しないために必要な各時点の節水率を、既往流量データの確率処理のみにより決定するため、気象長期予報等による流入予測のとりこみや、状況による安全度の変更がされにくい。

本論文では、これらの解消について検討し、一定の解決方法を示すものである。

2. 渇水確率と利水安全度指標の検討

渇水持続曲線は、一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N s時間内に貯水池が涸渇しないために各時点で確保しておかなければならない貯水量を、時間を移動しながら結んだもので以下の式で表わされる。

* 正会員 北海道開発局 局長官房 (〒060 札幌市中央区北8条西2丁目)

** 正会員 (株)建設技術研究所 札幌出張所 (〒060 札幌市中央区大通西9丁目 協栄生命ビル)

*** 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 (〒063 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

$$f_k(m|\tau) = K - t h \text{ smallest } \left\{ \min \left(\frac{1}{m} \sum_{t=t_1}^{t_1+m-1} q_t \right) \right\} \quad (1)$$

$j=1, 2 \cdots n \quad (j, \tau-s/2) \leq t_1 \leq (j, \tau+s/2)$

$f_k(m|\tau)$: 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 : 季節早延の考慮期間 ($s=0$ とする)

q : 流量

n : 流量資料のある年数

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

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

$$P_k = k / (n - Ns) + 1 \quad (3)$$

P_k : 危険率 (渇水確率年の逆数)

k : 順序統計量の小さいほうからの順位

n : 流量年数

Ns : 渇水を考慮する時間間隔

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

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

38 年の実績流量を用いて、仮想ダムに対し 1/38~10/38 まで流入量の確率年を変化させて渇水持続曲線を描き、各々について貯水池運用を行って、38 年間分の合計利水安全度指標を計算する。図-1 は 5/38、図-2 は 10/38 確率年の渇水持続曲線の図であり、このダムの場合は 5/38 確率年がダム規模、すなわち節水率ゼロの線がほぼダムの利水制限容量に近いものとなる。これより大きな渇水規模の場合は、例えば図-3 の 1/38 確率年のように、ダムの利水制限容量の線と渇水持続曲線がクロスする。この場合はどんな豊水年であっても、渇水持続曲線による節水ゾーンを通るため、利水安全度指標が大きくなってしまふ。このため、利水制限容量の線以上に水位がある時は節水率をゼロとする方法や、図-4 のように利水制限容量に接する節水率の渇水持続曲線を描き、それより上の渇水持続曲線を除外するといった対応が考えられる。

図-3 の制限水位に交わる線は、交点より左側の破線で示す部分については確率的意味を持たず、また現実的にはダム規模を決定するダム確保容量より上で節水をかけにくいいため、図-4 のようにクロスする線を除いた方が実用的であり、以下主としてこの方法を用いる。

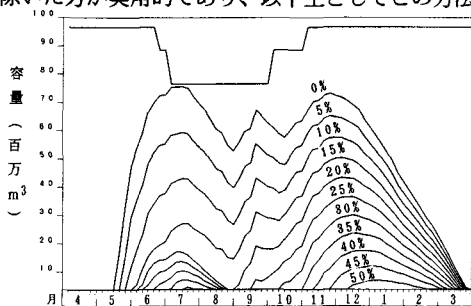


図-1 5/38 確率渇水持続曲線

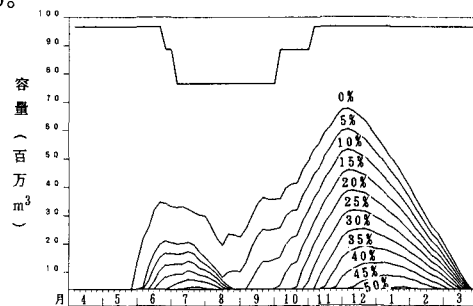


図-2 10/38 確率渇水持続曲線

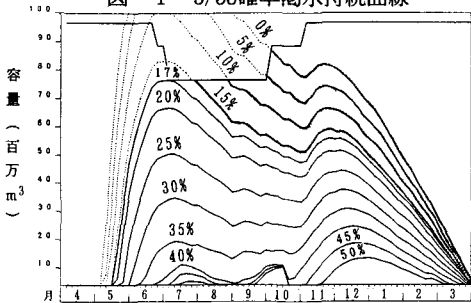


図-3 1/38 確率渇水持続曲線 (クロス線有)

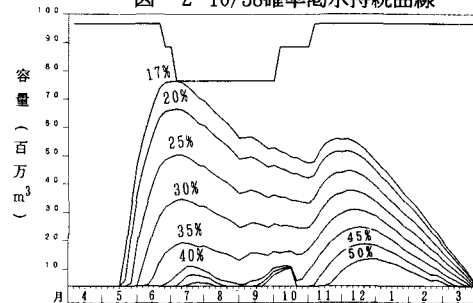


図-4 1/38 確率渇水持続曲線 (クロス線無)

図-5 は計算した 38 年の利水安全度指標の合計値を比較したものである。渇水持続曲線の最適形状は、利水安全度指標を最小にするものを選定する。実線は利水制限容量にクロスする線を除いた場合、破線はク

ロスする線を残し、貯水池運用時に制限容量に達した場合は節水率ゼロとしたものである。5/38確率年以上は両者の値は一致する。

利水安全度指標のうち、不足量や不足量の(%)dayは節水確率年が大きいほど小さく、節水をかけない方が渇水被害が小さい。これは節水量も不足量とみなせば、1つの渇水の不足量を節水で減らすことができないことから理解される。これらの指標は渇水の厳しさの度合いを含まないため、渇水の大きさを表す指標としては適当であっても、節水等のダム運用の効果を表す指標として用いるのには問題がある。

不足量の(%)²dayは6/38確率年が最小となるが、5/38確率年との差は殆ど無い。(%)²day・不足量は渇水被害関数とも呼ばれ、(%)³dayと同じ傾向を示す。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確率年が最小となり、利水安全度指標による最適確率の変化が分かるが、通常このような高次の(%)の指標は用いられていない。

3. ダム規模と利水安全度指標

以上のプロセスをダム規模を変えて実施し、ダム規模に対し最適な規模となる渇水持続曲線の関係を調べてみる。各確率の節水率ゼロの渇水持続曲線に接するようにダム規模を何通りか変化させ、その容量内で貯水位を運用した場合の38ヵ年間の利水安全度指標の合計値の変化を計算する。ダム規模より渇水持続曲線の規模が大きい場合は前出のクロス線の無い方法とする。一例として(%)²day・不足量の場合図-6のようになり、4/38~6/38確率年ではダム規模の確率年と最適渇水持続曲線の確率年が一致し、ダムに接するような渇水持続曲線が最適となる。しかしダム規模が小さくなると、ダム規模より渇水確率年の小さい渇水持続曲線、例えば10/38確率年規模の貯水池に対しては6/38確率年の渇水持続曲線を用いて、最初から強目の節水を加える方が効果的となる。

このようにダム規模により最適渇水持続曲線の規模が変化し、流域の利水安全度指標が定まれば、ダム規模とそれに応じた最適節水運用の組み合わせにより、より効果的な水資源計画及び管理方法を決定することが可能となる。

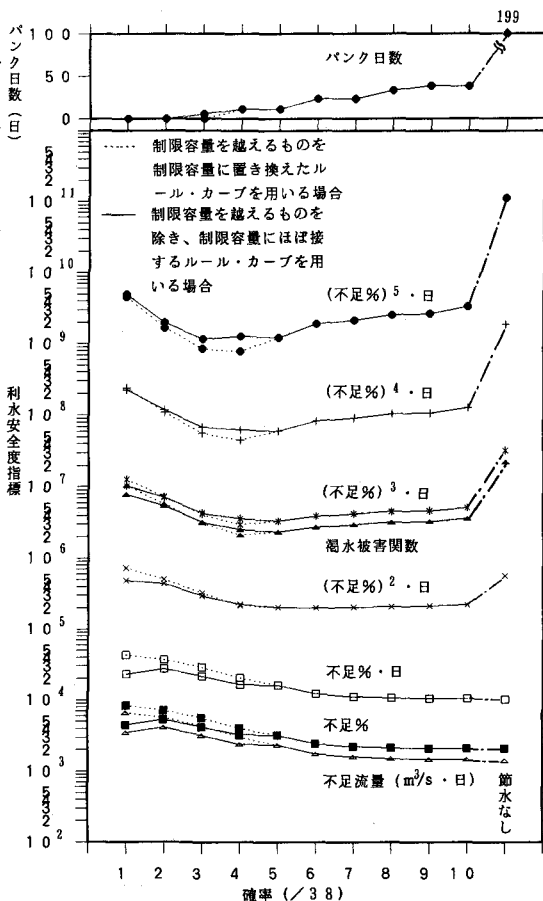


図-5 利水安全度指標と最適確率年

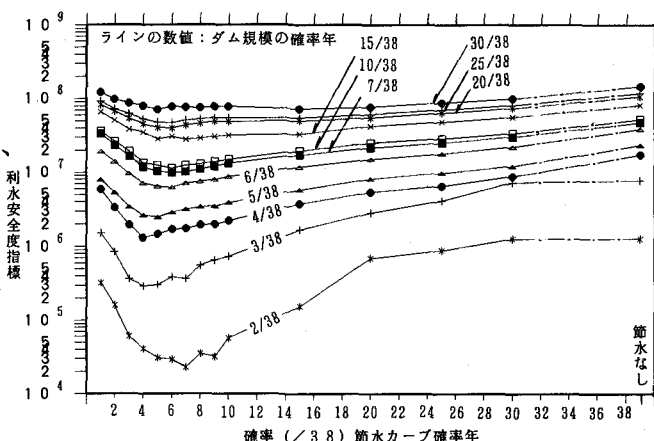


図-6 ダム規模による最適確率年と指標 (渇水被害関数)

4. 渇水持続曲線方式と段階節水方式の比較

流域スケールの節水運用ルールとして実用化されているものに‘段階節水方式’がある。これは通常、時期に関係なく一定レベルより水位が下がれば、節水を段階的にかけるものである。一方渇水持続曲線は、既往流量データの时期的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、渇水被害を小さくする効果大きい。

両者の概念図を図-7に示す。もしも段階節水の節水ラインと渇水持続曲線との位置関係が図-8のようになっているれば、水平な段階節水ラインは、時点がAからBへ移動するうちに、渇水確率年が1/4～1/10に変化している。このように段階節水方式は、安全度が時間的に一定でない分運用効率が劣る。

5. 段階渇水持続曲線の導入

従来、渇水持続曲線はダムの渇渇確率のみを最小とすることを目的として作られているが、最適形状の決定のためには前述したように、さらに種々の利水安全度指標の検討が必要である。この利水安全度指標は大きく2つに分けられると考えられる。

1つは下流域の被害を最小とするものであり、このためには下流域の利水目的に応じた被害関数としての指標の設定が不可欠で、 $(\%)^n \text{day}$ といった指標はこれに該当する。

これに対しダムを極力渇渇させないことや、無駄な節水の頻度を減らすことは、貯水池管理の面からの指標として位置づけられる。3節で示したように $(\%)^2 \text{day} \sim (\%)^4 \text{day}$ といった指標はダムに接するような確率の渇水持続曲線において最小となり、ダムの容量いっぱいを使って少しずつ節水をしていく方が効果的である。しかし実際のダム、特に上水道を目的とする場合などは、水が満々と貯留されている時に節水をし、結果的に節水をしなくともダムの渇渇には程遠かったという状況を繰り返すことは問題であり、‘節水の空振り’による人工渇水として極力避けるべきである。

またダム規模の渇水持続曲線は $(\%)^n \text{day}$ 等の指

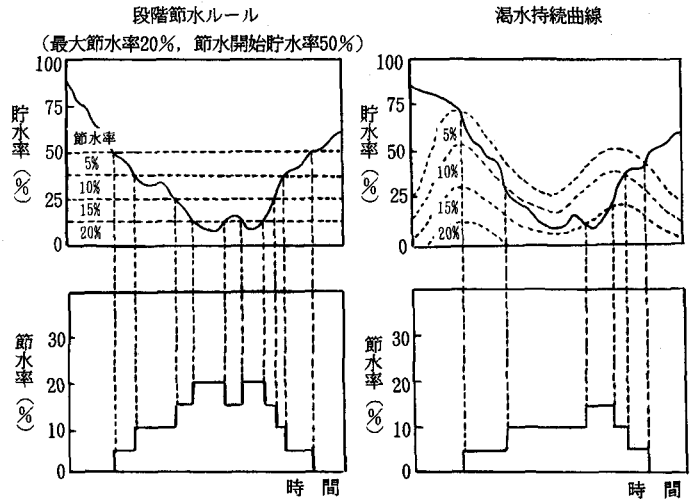


図-7 節水ルール概念図

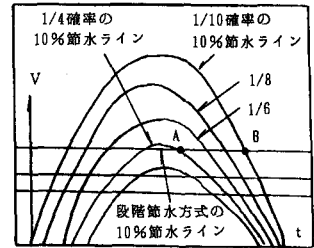


図-8 段階節水と渇水持続曲線の関係

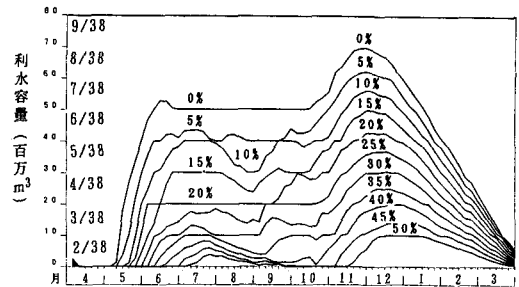


図-9 段階渇水持続曲線 (2/38～9/38)

表-1 段階渇水持続曲線の効果

確率年	渇渇日数	節水日数	不足 $\% \text{ day}$	(不足 $\%)^2 \text{ day}$	(不足 $\%)^3 \text{ day}$
1/38～8/38	0	1060	14.5×10^3	249×10^3	4884×10^3
2/38～9/38	0	980	12.9×10^3	222×10^3	4363×10^3
2/38～5/38	0	1909	18.5×10^3	235×10^3	3587×10^3
1/38	0	1101	22.9×10^3	484×10^3	10350×10^3
5/38	11	1789	16.2×10^3	206×10^3	3300×10^3
9/38	39	626	10.6×10^3	211×10^3	4604×10^3

標は最小であっても、ダムの涸渇（パンク）回数は最小ではない。両方の指標を最適化させるためには何らかの工夫が必要である。

こういった問題の解決のために、段階節水方式と従来の渇水持続曲線の折衷型を考えてみる。図-9は貯水池の容量百万 m^3 毎に流量の渇水確率を変えて渇水持続曲線を描き、容量の境目につなぎの線を入れたもので、段階渇水持続曲線と称する。水位が低くなるほどダム涸渇に対する安全度が高くなり、一方水位が高い時の節水は減少する。表-1は流量確率の違いによる段階渇水持続曲線と従来の渇水持続曲線の比較であり、段階渇水持続曲線はダム規模の5/38確率年の渇水持続曲線に比して $(\%)^2\text{day}$ や $(\%)^3\text{day}$ といった指標は増加するが、一方ダムの涸渇日数はゼロとなり、節水の回数も大幅に減少する。

6. 長期流入予測への渇水持続曲線の対応と効果

渇水持続曲線はダムが涸渇しないために必要な各時点の節水率を、既往流量データの確率統計処理のみから決定する方法である。このため、過去に生じたことの無い状況への対応や、気象長期予報による流入量予測値のとりこみが難しいという指摘が従来よりなされていた。しかし流入量の予測がされた場合は、従来の渇水持続曲線の確率流量値を予測流入量に置き換えることにより、容易に渇水持続曲線にとりこむことができる。

図-10はその例であり、従来の渇水持続曲線（実線）が、予測による期間A Bについて予測による曲線（破線）に置き換わり、予測のない時はA点では5%の節水が必要であったものが、予測を行う結果不要となる。

長期流入予測のためには気象の長期予測が不可欠である。しかし気象庁が発表している長期予報は信頼性の上では不十分であり、現状では貯水池管理には用いられていない。よって長期予測の効果をみるために、流入量が各時点で一定期間100%の信頼性で予測できたと仮定し、貯水池運用による利水安全度指標の変化を試算してみる。

図-11は予測期間毎に利水安全度指標の38ヵ年合計値を計算した結果である。もともとなる渇水持続曲線は、ピークがダム規模に近い5/38確率年のものを用いる。予測期間を横軸にとって利水安全度指標の変化をみると、全ての指標が予測期間の長期化に伴って減少し、長期予測の効果がみられる。しかし、その度合いは長期化に従って減少し、4ヵ月を過ぎると殆ど変化がない。この理由は長期予測により、いわゆる「節水の空振り」が減少し指標が良化するが、空振りが無くなるに従い減少量も鈍り、4ヵ月では空振り自体が無くなってしまいうためである。

一方図の1番左の節水無しの点と節水を行った点（予測なし）を比べると、節水を行った方が $(\%)^2\text{day}$ で

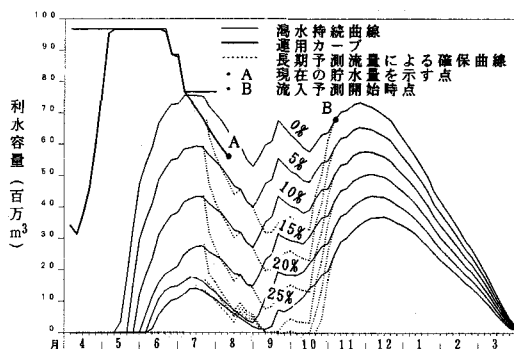


図-10 流入予測の導入

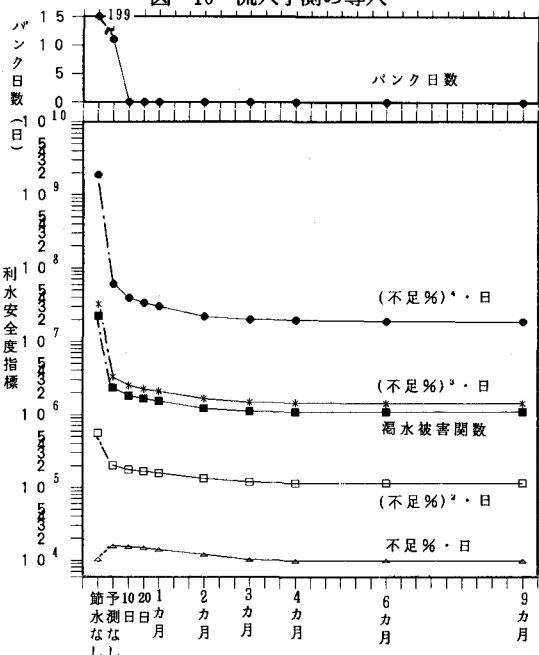


図-11 流入予測期間による利水安全度指標変化

1/3, $(\%)^3 \text{ day}$ で1/10にまで減少し、渇水持続曲線の効果がこれらの指標に対し著しいことが分かる。それに対し、さらに長期予測を用いた場合の効果は比較的小さい。図-12は利水安全度指標について予測なしの時の数値を100%として%表示したものであるが、10日間の流入量を各時点で100%予測し続けても、 $(\%)^2 \text{ day}$ で11%, $(\%)^3 \text{ day}$ で23%の減少に止っている。現在の気象台の長期予報は、週間予報でも具体的な流入予測に結びつくまでのデータには至っていない。今後の精度向上を考えても、当面はせいぜい10日間程度と考えられることから、流入予測による渇水被害の減少には限界があることが分かる。

図-13及び図-14は、一定期間先まで100%流入予測が可能であった場合の、ある年の渇水持続曲線の形状と貯水池運用を破線で示すものであり、比較のために流入予測の無い場合の線も実線で記入してある。10日間予測の場合は線の重なりが多く、予測による差が小さい。一方4ヵ月予測の場合は渇水持続曲線の形状は大幅に異なり、運用線と渇水持続曲線が交わらず、無駄な節水が無くなっている。

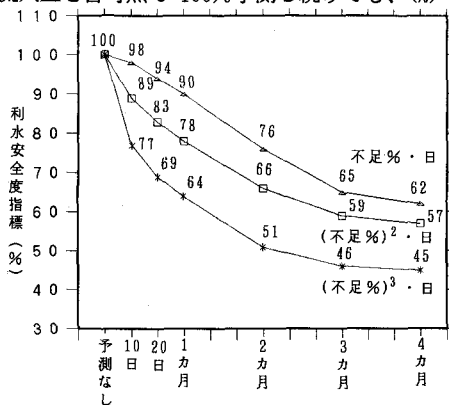


図-12 流入予測期間による利水安全度指標変化

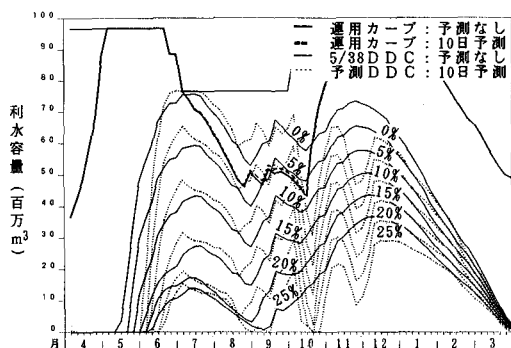


図-13 長期予報の効果(昭和57年)10日予測

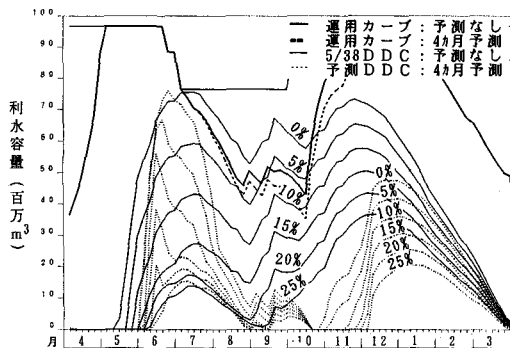


図-14 長期予報の効果(昭和57年)4ヵ月予測

7. あとがき

渇水持続曲線による方法は、状態が図示されるために極めて理解されやすいほか、流入予測等の条件による変更も本論文で示したように比較的容易であり、適用性が高いと考えられる。容量が定められた場合の最適形状については、下流域の渇水被害の防止に加え、節水の空振りの減少、渇水安全度の向上といった点を考慮して定めることが可能である。しかしその判断基準となる指標については、今後さらに検討を進める必要がある。

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, 1980
- 2) 竹内邦良, 富田茂, 伊藤幸蔵; 給用水貯水池のためのDDCルールカーブ, 第28回水理講演会論文集, 1984
- 3) 七沢馨, 渡辺和好, 星清; 地域特性を考慮したダム運用ルールに対する一考察, 土木試験所月報411, 1987
- 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, 1988
- 5) 許士達広, 渡辺和好, 下田明; 渇水持続曲線によるダムの低水管理, 第46回年次学術講演会, 1991
- 6) 許士達広, 渡辺和好, 下田明; 渇水持続曲線による節水方式に関する一考察, 第47回年次学術講演会, 1992