

渇水持続曲線法とマスカーブ法

DROUGHT DURATION CURVE METHOD AS COMPARED WITH MASS CURVE METHOD

竹内 邦良*・吉川 秀夫**

By Kuniyoshi TAKEUCHI and Hideo KIKKAWA

1. 序

筆者らはかねてより渇水対策の水文学的アプローチとして渇水持続曲線法を提唱し、吉川・竹内(1975)では渇水持続曲線の定義・統計的性質・応用の原理を、竹内・吉川(1979)では残流域流出のある一般システムへの応用・渇水期間中の adaptive control への適用方法を示すことによって、ほぼ実用上の処方完成させている。本稿はこれをふまえて、従来方法であるマスカーブ法との理論的ならびに経験的対比を示すことによって、現場の水管理者の利用上の便宜を図ろうとするものである。

このため次節にまず渇水持続曲線法の基本的特徴・新しい発想方法・要注意事項等についての指摘を掲げる。

3. では渇水持続曲線法(Drought duration curve method; DDC法)とマスカーブ法(Mass curve method; MC法)の理論的対比を試み、ダム地点において一定量取水するという条件のもとではDDC法により算定される渇水対策用必要貯水量は、MC法による貯水量より常に小規模に算定され、その他の条件のもとではその大小関係は需要・流出量時系列の特性に依存することを示す。続く4.ではその差を各種の実データならびに模擬データを用いて定量し、ダム地点から一定量取水する場合にはDDC法ではMC法に比べ平均10%弱、最大20%程度小規模になり、取水量に変動のある場合には逆に平均16%、最大では70%程度大規模に算出されることを示す。

以上の検討を通じて本論文の結論するところは、一般の渇水計画の条件のもとでは、DDC法とMC法の用いる渇水年の定義に基本的な相違があるにもかかわらず、ほぼ同等に扱ってさしつかえなく、上記論文に掲げた

DDC法を用いることの利点は、引き換えに失うものなく生かされるということである。

2. 渇水持続曲線法の特徴

本節では、渇水持続曲線法の特徴のうち、intensity-duration curve方式であることの意義、渇水持続曲線が一般化された確率渇水年の指標となっていること、ならびに、降雨量ではなく流量を用いて渇水持続曲線を描く場合の注意事項について述べる。

(1) 渇水持続曲線法と計画渇水方式

渇水と洪水とは、水文学的には降雨の多寡より生じる表裏の現象であって、現象の解析においても、被害回避策の検討にあたっては、類似した概念が役立つことが少なくない。渇水持続曲線法も、その基本概念はすでに洪水計画手法の一部として定着している確率降雨強度曲線(たとえば岩井・石黒, 1970)と共通する面が多いので、渇水持続曲線法利用上の特質は降雨強度曲線のそれと対比してみるとわかりやすい。

洪水計画立案の基礎入力として確率降雨強度曲線、すなわち生起確率をパラメーターとした短時間・ピーク降雨量のintensity-duration curveが用いられるのは、都市河川整備・下水道設計等、中小流域からの流出を対象とする場合である。これに対し大河川の洪水計画には、既往の大洪水時の降雨記録に基づいて構成された計画降雨が基礎入力として用いられる(日本河川協会編, 1977)。一方、渇水対策のための貯水池計画には、これまでのところ既往の流出時系列ないしはそれに基づいて模擬発生された時系列データを入力とするマスカーブ法しか実用されていないようである。渇水持続曲線法は洪水計画という確率降雨強度曲線(渇水計画にはむしろ確率寡雨強度曲線とよぶべき)の利用可能性を実現させるものであるが、まずその導入の必然性に言及しておく。

* 正会員 Ph. D. 山梨大学助教授 工学部環境整備工学科

** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

洪水計画にあっては、中小流域と大河川という対象流域の大きさで基礎入力である降雨資料の用い方を変えているが、そのおもな理由は両流域の水文学的特性の差にある。中小流域にあっては、洪水の流達時間が短いため、その流域での洪水の特性を決定するのは降雨のピーク部分の形態、ことにその集中度合である。したがって中小流域での洪水対策を考える場合には、降雨全体のパターンそのものは問題にならない。一方、大河川の洪水計画を立てる場合にはこのような特殊事情は当てはまらないから、より総合的な時空間的性質を備えた降雨として、既往の実績降雨を基礎資料とすることになる。

渇水の場合には流域の大小ということで降雨資料の用い方を変える理由はない。たしかに大流域は安定した流出があり、中小流域では潤渇が起りやすいため、前者ではたとえば1年以上、後者では数か月というように時間的平滑化のためのタイムスケールが異なるが、いずれもごく短時間の降雨時系列は問題にならないという点で共通している。すなわち渇水計画にあっては、流域の大小を問わず比較的長い期間内の平均的降雨量が問題であって、洪水計画とは逆の意味でやはり生の時系列データをそのまま用いる必要はないということができる。とすれば、唯一再現性のない観測時系列そのものに基づく計画渇水方式ではなく、必要なタイムスケールである長期にわたる降雨の統計的性質を抽出して、その特性に基づいた計画を立てるのが論理的である。すなわち、中小流域の洪水計画が短時間ピーク降雨量を主影響要因としているため降雨強度曲線方式を取っているように、渇水計画にあっては長期平均降雨量が主影響要因であるため、やはり intensity-duration curve 方式を用いるのが必然となるわけである。渇水持続曲線法導入の妥当性はここにある。

(2) 一般化された確率渇水年指標

確率降雨強度曲線は豪雨に関する確率年の指標である。何年確率では何十分以内に強度何 mm/hr まで降るかを示している。渇水持続曲線も渇水に関する確率年の指標であって、これは何年確率では何日平均で何 mm しか降雨のない事態が生じるかを示している。この形の渇水年指標が従来のものと異なる点は、各期間長ごとに確率年を定義していることにある。この新しく加えられた対象期間長というパラメータのゆえに、渇水持続曲線を一般化された確率渇水年の指標とよぶ。

現在水道管理者らによりしばしば用いられている %day という指標は、給水制限百分率×制限日数により水不足の度合を表すものであるが、渇水が現実にもたらした社会的影響の尺度としては適当なものと考えられる。しかしながらこれはあくまでも社会的影響度の尺度であ

ってその原因となる水文状況の尺度ではない。従来しばしば用いられる多くの渇水指標はこれとまったく同じ性質をもっている (たとえば Takeuchi, 1974 参照)。その特徴としては第1に水の需給アンバランスの度合を示す目的を課せられていること、第2にはそのアンバランスを不足分の積分値の形でとらえており、そこに至る経緯は問わないということが挙げられる。これはいずれも水文学的尺度としては不適当な性質である。まず需給とは無関係な絶対的尺度が必要であり、また時系列特性を伝えられる情報量をもたなくてはならない。渇水持続曲線はこの双方の条件を満足することによって、渇水の水文学的指標として妥当なものになっている。なお水需要量と無関係な水文学的渇水指標の必要性については吉川・竹内 (1975) の冒頭に論じているので繰り返さない。

(3) 流量資料に基づく渇水持続曲線

降雨資料ではなく流量資料を用いて渇水持続曲線を作成する場合には、降雨・流出系の遞減部の存在のために多少の注意を要する。以下に述べるのはこの問題に対する基本的考え方と、略式対処法である。

流量変動は流域が貯水池としての機能を果たしているため、いったん増した流量が突然潤渇することはなく、必ず遞減部をもつ。とすれば今後 m 日間に最低保証できる流出量を算定するときには、すでに流域貯水池にためられていて現時点で実在している分と、今後に見込まれる降雨により流出する分との合計を考える必要がある。 τ 時点での流量に基づく、その後の時点 t における遞減部流出量 (降雨がなく流出する量) を $q(t|\tau)$ とし、 t 時点における実流量を $q(t)$ とすれば、 τ 日以後 m 日間に新しい降雨により追加される流出量の合計は、

$$\sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} (q(t) - q(t|\tau)) \dots \dots \dots (1)$$

である。ここに遞減曲線 $q(t|\tau)$ の推定量としては、遞減率 λ を一定として、

$$q(t|\tau) = q(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} \dots \dots \dots (2)$$

としても大きな間違いはないであろう。さらに誤差の少ない方法としては低水流出の予測に適しているタンクモデルによる推定量を用いることもできる。

m 日間の平均の追加流出量に関する渇水持続曲線は、

$$f_k(m) = k\text{-th smallest} \cdot \min_{j=1, \dots, N} \dots \dots \dots \frac{1}{m} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} (q(t) - q(t|\tau)) \dots \dots \dots (3)$$

と計算される。 N は観測年数、 k -th smallest は確率年としては、

$$T_k = \frac{N+1}{k} \dots \dots \dots (4)$$

年に相当する。この渇水持続曲線を用いて算定された給

水水準-必要貯水量関係の 利用にあたっては、現有貯水量を次のように扱う必要がある。すなわち、 τ 時点で今後 m 日間が無降雨であっても利用できる現有貯水量を $V(m|\tau)$ とすれば、これは現在貯水池にたまっている水量 $V(\tau)$ とすでに流域貯水池にたまっている m 日間に流出の見込まれる量との和

$$V(m|\tau) = V(\tau) + \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} q(t) \dots\dots\dots (5)$$

としなければならない。

次に逓減部流出を直接式 (1) のようには考慮しない略式対処法について述べる。逓減部流出量のうちの大部分は時間には無関係とみなしてさしつかえない一定量の基底流出であるから、対象期間長が長くなるに従って変動部分の相対的影響は減少していく。したがって、ある程度以上の期間長を考えれば、流出量 $q(t)$ のうちのすべてが基底流出プラス現時点以後の雨による新規流出であるとみなしても大差ない。このとき式 (3) に代わって渇水持続曲線は、

$$f_k(m) = k\text{-th smallest} \cdot \min_{j=1, \dots, N} \frac{1}{m} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} q(t) \dots\dots\dots (6)$$

により与えられる。この $f_k(m)$ を、その成立条件である、ある程度大きい m についてのみ利用するのがこの略式対処法である。実際問題としては、渇水期乗り切りのための必要貯水量が、需要と渇水流量の差 (不足分) の数百分、すなわち m が 20~30 の部分の $f_k(m)$ の値が問題になる場合というのは特殊な場合であって、普通は略式で十分であろう注1)。

3. 渇水持続曲線法とマスカーブ法 : 理論的対比

本節では DDC 法と MC 法による必要貯水量の理論的対比を行う。以下の理論展開は次の仮定を前提としている。第1は先行降雨による逓減部流出を考慮しない渇水持続曲線を用いることである。すなわち式 (6) を定義に採用する。第2には水の需要量時系列 $X(t)$ としては年内変動はあるが、各年同じ変動が繰り返すものとする。この他の仮定としては、はじめにダム地点で需要量を取水する単純な形式の場合を扱い、残流域流出を考慮

注 1) たとえば利根川上流水系 6 貯水池の夏期利水容量は合計約 2 億 6 千万 m^3 であるが、これに依存する夏期利水量は群馬・栃木・南関東分合わせて約 560 万 m^3 /日であって、貯水池容量は需要の約 46 日分となっている(建設省河川局編, 1973)。いま $f_k(m)$ が仮に原点を通る直線で近似できるものとすると、このとき問題になる m の値は 46 日の 2 倍で約 90 日の近傍ということになる。しかも利根川水系の水資源事情が、全国的にも決して安全性の高いものではないことを考え合わせるなら $m=90$ でさえ決して大きい部類に属するものではない。

せねばならない場合は後で扱っている。

水需要 $X(t)$ と、ダム地点への流入量 $q(t)$ との差 $X(t)-q(t)$ の任意の m 日区間の累加量のうち、 j 年の最大値は、

$$V_j(m) = \max_{\tau \in \text{year } j} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} \{X(t)-q(t)\} \dots\dots\dots (7)$$

と表される注2)。

MC 法ではまずこの関数の m に関する最大値 V_j を求める。これが j 年の 1 日たりとも水不足を生じさせないために準備されていなくてはならない貯水量である。すべての観測年 (N 年間) に対するこの値のうち k 番目最大のものを $T_k = (N+1)/k$ 年渇水のための必要貯水量 ${}^M V_k$ とするのが MC 法による必要貯水量の定義である。すなわち、

$${}^M V_k \equiv k\text{-th largest} \cdot \max_m V_j(m) \dots\dots\dots (8)$$

となっている。

(1) 流量変動特性の均質な季節に適用する場合

次に DDC 法による必要貯水量算定方式の定義に移るが、まずそれが流量変動特性のおおむね均質な時期に限り適用される場合について述べる。この条件は洪水期、非洪水期など大幅にその確率・統計的性質の異なる複数の季節の流量の平滑化機能は期待されていない貯水池を対象にするとということである。

DDC 法ではまず渇水持続曲線 $f_k(m)$ 、すなわち T_k 年渇水である限りどの m 日区間でも確保できるダム地点への流入量を式 (6) により算定する。これに基づいて T_k 年渇水の年に 1 日も需要量 $X(t)$ に不足をきたさないために必要な補給用貯水量 ${}^D V_k$ は、

$${}^D V_k \equiv \max_m \{ [\max_{\tau} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} X(t)] - f_k(m) \cdot m \} \dots\dots\dots (9)$$

として求めるものと定義されている。右辺第 1 項を

$$d(m) = \max_{\tau} \frac{1}{m} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} X(t) \dots\dots\dots (10)$$

すなわち最大 m 日移動平均需要量 (以後これを需要持続曲線とよぶ) を用いて書きなおせば、式 (9) は、

$${}^D V_k \equiv \max_m \{ d(m) - f_k(m) \} \cdot m \dots\dots\dots (11)$$

と表される。ここに明らかなように DDC 法の必要貯水量算定のための基本方針は、需要の最大となる期間に流入量の最小となる期間を重ね、最悪の場合でも十分な供給 (期待する安全率ないしは危険率のもとでの供給) ができるような貯水量を準備しておこうというものである。このように需要と流量両時系列の組合せの中で、最

注 2) これは大略、 j 年におけるどの m 日区間であっても水需要 $X(t)$ を満足するために必要な貯水池からの補給量ということであるが、必ずしも m に関する単調増加関数ではないため、厳密にはそうはならない。

悪の位相差を想定して高い安全性を見込むことは、必ずしもいつも妥当であるとはいえない。このような操作が適当な場合というのは両者の組合せがどうい位相差になっても不思議はないような状態であり、具体的には流量変動の確率・統計的性質がおおむね均質な時期ということになる。したがって通常はたとえば次節で扱うように多雨期と寡雨期に分けて適用するなどの措置が必要である。なお、このように最も不利な位相差を考慮することが、極端に低い確率の状況を対象にしているかに誤解されがちであるが、ここでは需要変動 $X(t)$ としては各年で固定されたものを扱っているため、ランダム変動するのは流入量時系列のみであるからその解釈は不適當である。なお $X(t)$ に関するこの仮定は、流量変動の大きさに比べ需要の年パターンからのずれはかなり小さいとみられるため現実的と判断される。

以上で MC 法ならびに DDC 法による必要貯水量の定義が明らかにされたので、以下に両者の比較を行う。式(9)を式(6)を用いて変形すると、

$${}^D V_k = \max_m \cdot k\text{-th largest}_{j=1, \dots, N} \left\{ \max_{t=\tau}^{\tau+m-1} \sum_{l=\tau}^{\tau+m-1} X(t) - \min_{t=\tau}^{\tau+m-1} \sum_{l=\tau}^{\tau+m-1} q(t) \right\} \dots (12)$$

$$\geq \max_m \cdot k\text{-th largest}_{j=1, \dots, N} \cdot \max_{t \in \text{year } j} \sum_{l=\tau}^{\tau+m-1} \{X(t) - q(t)\} \dots (13)$$

$$= \max_m \cdot k\text{-th largest}_{j=1, \dots, N} V_j(m) \dots (14)$$

ここに式(13)の等号は、

$$X(t) = \text{const.} \dots (15)$$

のときのみ成り立つ。式(8)~(15)をまとめて書くと、

$${}^M V_k \equiv k\text{-th largest}_{j=1, \dots, N} \cdot \max_m V_j(m) (=A_k) \dots (8)$$

$${}^D V_k \equiv \max_m \{d(m) - f(m)\} \cdot m \dots (11)$$

$$\geq \max_m \cdot k\text{-th largest}_{j=1, \dots, N} V_j(m) (=B_k) \dots (13)$$

ただし等号は $X(t) = \text{const.}$ の場合に限る、ということになる。式(8)ならびに式(13)の右辺の値を A_k, B_k とし、その大小関係を Fig. 1 を用いて検討する。

Fig. 1 は横軸に m 、縦軸に $V_j(m)$ をとり、 $j=1, \dots, 5$ をパラメーターとして5本の $V_j(m)$ を描いてある。式(8)の意味するところは、この5本の山形の曲線において、まず各曲線の最大値、すなわち○印の点を求め、次にその大きい方から k 番目(ここでは仮に3番目)のものを T_k 年渇水に対する必要貯水量 A_k (Fig. 1(a)では A_3) とするということである。一方式(13)は、各曲線の最大を求める前に、各 m の値に対する大きい方から k 番目のものばかりを連ねた曲線を作り(3番目ばかり連ねたものを Fig. 1(a)に太線で示してある)、そ

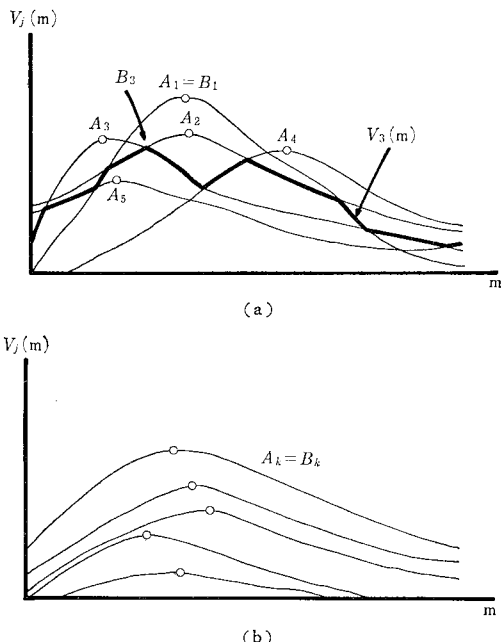


Fig. 1 Hypothetical $V_j(m)$ curves for graphical proof to the inequality $A_k \geq B_k$

の新しい曲線の最大値をもって T_k 年渇水に対する必要貯水量 B_k とするよう指示している。図から一目瞭然であるように、常に、

$$A_k \geq B_k \dots (16)$$

の関係にある。ただし $k=1$ のときは必ず $A_1 = B_1$ であり、また Fig. 1(b) のように、 $V_j(m)$ が各年 j ごとに相重ならない様相を呈するときには式(16)は等号のみとなる。Fig. 1(b) のような $V_j(m)$ 曲線の生じるケースは、各年の渇水の厳しさが、どの期間長に対しても同じ順位になるという特殊な場合に相当するが、現実には第1位の場合を除いてまれである。

以上の結果から結論される関係は、一般の水需要時系列 $X(t)$ に対して、

$${}^M V_k = A_k \geq B_k \leq {}^D V_k \dots (17)$$

$X(t) = \text{const.}$ の場合に対して、

$${}^M V_k = A_k \geq B_k = {}^D V_k \dots (18)$$

ということである。これより需要が一定という条件のもとでは、DDC 法による必要貯水量は常に MC 法によるそれを下回り、需要の変動する場合にはその関係は不定であるということがわかった。

(2) 複数年の平滑化機能をもった貯水池への適用

上の渇水持続曲線法による必要貯水量算定式の定義では、おおむね均質な期間に適用することが必要であったが、貯水池ないしは貯水池群の規模によっては、複数の季節・年の平滑化を対象としているものが少なくない。このような場合に適用するためには式(9)の定義に替え

て渇水持続曲線法では次のように必要貯水量を求めることにしている。

$$DV_k \equiv \max_m \cdot k\text{-th largest} \left\{ \max_{j=1, \dots, N} \left[\sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} \{X(t) - \bar{q}(t)\} - \min_{\tau \leq \text{year} \leq j} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} q'(t; j) \right] \right\} \dots\dots\dots(19)$$

ただし,

$$q(t) = \bar{q}(t) + q'(t; j) \dots\dots\dots(20)$$

ここに式 (20) は流入量 $q(t)$ を各年同一の平均的パターン $\bar{q}(t)$ と、各年ごとに異なる平均パターンからのずれ $q'(t; j)$ との和として扱うことを意味している。したがって式 (19) 右辺第 1 項は、各年の需要パターンと流入量の平均パターンの差に基づく必要貯水量の固定分であって、本来 j 年には無関係で、

$$\max_m \cdot \max_{\tau} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} \{X(t) - \bar{q}(t)\} = \max_m v(m) = \bar{V} \dots\dots\dots(21)$$

と表されるべきものである。また第 2 項は、

$$\max_m \left[-k\text{-th smallest} \cdot \min_{j=1, \dots, N} \left[\frac{1}{m} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} q'(t; j) \right] \right] \cdot m = \max_m \{0 - f'_k(m)\} \cdot m = U_k \dots\dots\dots(22)$$

と変形するとわかるように、流入量の年パターンからのずれの時系列 $q'(t; j)$ に対する渇水持続曲線 $f'_k(m)$ を用いて、需要量を零とした場合の、ずれによる必要貯水量の増分を計算している。ここに $f'_k(m)$ は一般に負であるから U_k は正となる。したがって式 (19) は、

$$DV_k \equiv \max_m \{v(m) - f'_k(m) \cdot m\} \dots\dots\dots(23)$$

と表され、また変形されて、

$$\geq \max_m \cdot k\text{-th largest } V_j(m) \dots\dots\dots(24)$$

なる不等式関係が成り立っている。式 (23) の意味することは、これが式 (9) の定義とは異なり、需要・流量変動の最悪の組合せを算定することにはなっていないということである。平均的パターンについては両時系列のそのままの組合せにおける差から必要貯水量の固定分を求め、平均的パターンからのずれについてのみ最悪の組合せ、すなわち最悪のずれがどの時期に生じるかわからないと仮定している。明確な季節パターンの存在する場合の仮定としては妥当なものであろう。ただし平均的パターンからのずれについても季節性が認められる場合が一般的であるため、式 (19) をそのまま用いることのできる例は少ない。そのような場合については稿を改めて論ずる予定である。

式 (24) の意味することは、この場合も式 (17) が成り立っていて DDC 法による必要貯水量と、MC 法に基

づくそれとの大小関係は不確定ということである。

(3) 残流域流出を考慮する場合

取水施設がダムサイトではなく、それより下流に設けられている場合、貯水池で制御されない残流域流出も利用することができる。これをどの程度、またどのように見込むべきかというのが本節の課題である。

残流域流出を $r(t)$ とすると、この流出のうち需要量 $X(t)$ を満足するために利用できる流量は $r(t)$ 、 $X(t)$ のいずれか小さい方である。DDC 法ではどの m 日区間でも必ず利用できる平均流量を問題にするから、

$$h_j(m) = \min_s \cdot \min_{\tau \leq \text{year} \leq j} \frac{1}{m} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} \min \{X(t+s), r(t)\} \dots\dots\dots(25)$$

を計算せねばならない。ここに s は、需要と残流域流出の位相差がどのようであっても必ず確保できる流量を求めるための中間変数である。上式から T_k 年渇水の年に確保できる m 日平均流量として、

$$h_k(m) = k\text{-th smallest}_{j=1, \dots, N} h_j(m) \dots\dots\dots(26)$$

が求められる。これを残流域渇水持続曲線とよび、式 (6) で定義された $f_k(m)$ はダム地点渇水持続曲線とよんで両者を区別している。 $h_k(m)$ を用いて DDC 法では必要貯水量を

$$DV_k \equiv \max_m \{d(m) - h_k(m) - f_k(m)\} \cdot m \dots\dots(27)$$

とすると定義している。ここにやはり残流域流出とダム地点への流入量、ならびに需要変動がおのおのの独立に最悪の組合せとなることを想定しているため、おおむね均質な時期を対象にしなければならない。

なお複数の季節を含む期間を対象にする場合には前項 (2) と同様の考え方で、残流域流出 $r(t)$ を

$$r(t) = \bar{r}(t) + r'(t; j) \dots\dots\dots(28)$$

と平均パターンならびにそれからのずれに分け、平均パターンに基づく必要貯水量の固定分は、

$$v(m) = \max_{\tau} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} \{X(t) - \min \{X(t), \bar{r}(t)\} - \bar{q}(t)\} \dots\dots\dots(29)$$

また、ずれの存在に伴う必要貯水量の増加分は、残流域流出よりの取水量の平均パターンからのずれの渇水持続曲線

$$h'_k(m) = k\text{-th smallest} \cdot \min_{j=1, \dots, N} \left[\frac{1}{m} \sum_{t=\tau}^{\tau+m-1} \min \{X(t) - \bar{r}(t), r'(t; j)\} \right] \dots\dots(30)$$

ならびに式 (22) で定義したダム地点流入量のずれに対する持続曲線 $f'_k(m)$ を用いて、

$$DV_k \equiv \max_m \{v(m) - h'_k(m) - f'_k(m)\} \cdot m \dots\dots(31)$$

と定義される。この定義の基づく方針も、またその限界

もすでに前項で述べたものと同様である。

本項の定義 (27), (31) 両式にあってはいずれも式 (17) の関係が成り立っており, DDC 法による必要貯水量と MC 法によるそれとの大小関係は不定である。

4. 渴水持続曲線法とマスカーブ法: 各種流量資料による対比

前節の理論的対比の実質的内容, すなわち DDC 法による必要貯水量と MC 法によるそれとの差の詳細について検討する。ただし (1)~(3) すべての場合について調べたものではなく (1) の場合に限って検討した結果である。この結果は一般の場合を考えるうえでの基礎資料となるものである。この場合前提となっている条件は, 渴水持続曲線算定にあたって流域貯水池からの逓減部流出を考慮せず, (6) の定義式を用いていること, また適用対象期間としてはおおむね均質な期間を選び, 式 (9) をもって必要貯水量を計算することである。需要量 $X(t)$ については一定の場合ならびに変動のある場合両ケースを検討した。流量資料としては実流量資料ないしはそれに準ずる 2 ケースのほか, 模擬発生資料をも用いて結果の一般性を高めた。

実流量データとしてはまず富士川支流波木井川の流出量を用いた。これは身延町身延高校における甲府気象台管理の 33 年分の日雨量記録を, 砂田がタンクモデルを用いて日流量換算したもの (西宮編, 1979) であり, 十分実流量としての性質を備えていると判断される。これを身延データとよぶ。基本的統計値は, 平均 $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 標準偏差 $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 日相関係数 0.87 である。

次のデータは, 神流川の万場地点の日雨量記録 (1901~10 年, 1962~70 年), ならびに思川支流滑川の草久地点の日雨量記録 (1924~27 年) のものを合わせて合計 23 年分のデータとし, それを北上川支流胆沢川石淵地点における流出モデルとして菅原 (1972) がパラメータ決定したものへの入力に用いて得られた流量時系列である。これを仮に万場データとよぶが, 実体は架空の地点の半擬似データである。基本的統計値は, 平均 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 標準偏差 $4.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 日相関係数 0.58 である。

第 3 のデータセットとしては, 単純な Thomas-Fiering モデルを用いて発生させた模擬データを選んだ。保存される統計量 μ, σ, ρ としては, 身延データの平均 \bar{q} , 標準偏差 s , 日相関係数 r を用いた。ただし ρ には観測値 0.87 のほか 0.95, 0.2 も用いた。発生モデル

$$q(t) = \mu + \rho(q(t-1) - \mu) + \sigma\sqrt{1-\rho^2}\epsilon(t) \dots (32)$$

において, $\epsilon(t)$ は平均 0, 分散 1 の正規分布に従う乱数とした。発生長は 100 年。以上 3 種類のデータセットの一覧表を Table 1 としてもまとめている。

Table 1 Discription of Data Used for Simulation

	Rainfall Data Station	Rainfall-Runoff Model	Data Length	Statistical Parameters
Data 1.	Minobu	Hakii R. identified by Sunada	33 years (1940~76)*	$\bar{q}=5.1 \text{ m}^3/\text{s}$ $s=3.8 \text{ "}$ $r=0.87 \text{ "}$
Data 2.	Mamba & Kusakyu	Tanzawa R. identified by Sugawara	23 years (1901~10, 62~70) & (1924~27)	$\bar{q}=3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ $s=4.9 \text{ "}$ $r=0.58 \text{ "}$
Data 3.		Thomas-Fiering Model $\rho=0.87$ $=0.95$ $=0.2$	100 years 11 cases 11 cases 1 case	μ and σ are Minobu's \bar{q} and s ;

* 3 years missing

解析対象期間はいずれの場合も 5 月 1 日から 9 月 27 日までの 150 日間とした。上に掲げた平均値等の統計値はすべてこの期間に対するものである。これは通常渴水期間とみなされる区間であるが, 必ずしもこの 150 日を考えるのが適当ということではなく, 単に区間選定の一例として取り上げたにすぎない。給水水準としては平均 1, 2, $3 \text{ m}^3/\text{s}$ の 3 種を考慮した。

(1) 水需要を一定とした場合の計算結果

まず水需要に変動がなく, 式 (15) の成立している場合についての結果を述べる。これは式 (18) の関係の詳細を検討するということである。Fig. 2, 3 はそれぞれ身延, 万場データを用いた場合の ${}^M V_k, {}^D V_k$ を確率渴水年 T_k に対してプロットしたものである。まず第 1 にいずれの場合も ${}^M V_k \geq {}^D V_k$ という式 (18) の関係が

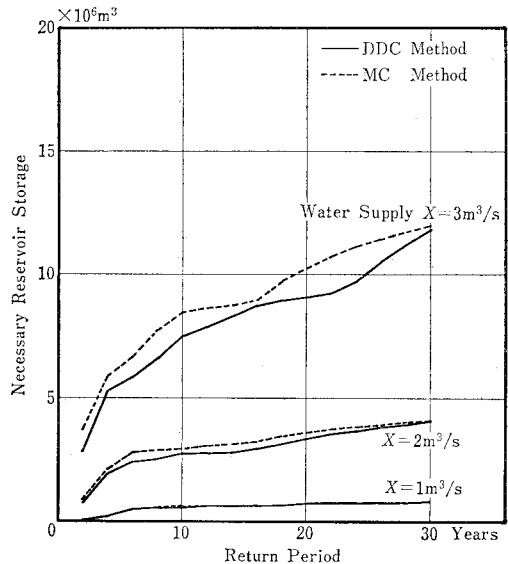


Fig. 2 Comparison of Necessary Reservoir Storages by DDC and MC: constant water supply —Minobu Data—

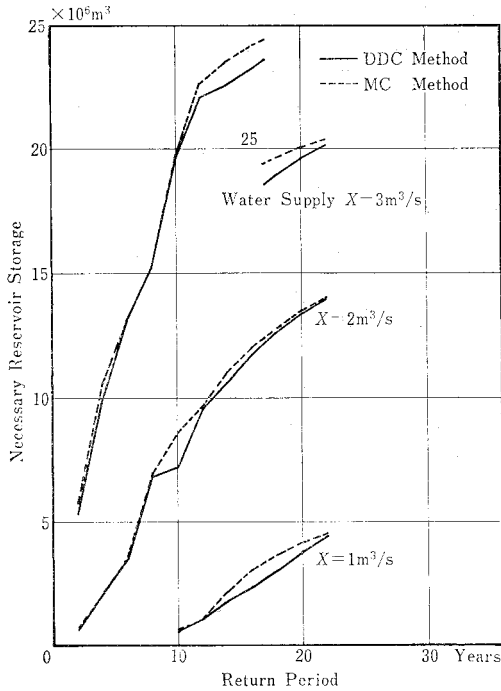


Fig. 3 Comparison of Necessary Reservoir Storages by DDC and MC: constant water supply
—Mamba Data—

成立していることがわかる。水需要水準が 1, 2, 3 m³/s と大きくなるにつれ必要貯水量の大幅に増大すること、また身延データと万場データでは平均値がそれぞれ 5.1 m³/s, 3.2 m³/s であるため、必要貯水量は万場の方が大きいこともうなずける。万場の場合確率渇水年の増加すなわち安全率の増加に伴う必要貯水量の伸びが著しいのは、流量の変動係数が身延データの 0.75 に比して 1.53 と 2 倍も大きいためである。この結果流量の日相関係数が身延の場合の 0.87 に比べ 0.58 と小さいために必要貯水量が少なくてすむはずの影響はこの図には表れていない。

次に Fig. 2, 3 における MV_k と $^D V_k$ の差の MV_k に対する比

$$K_k = \frac{MV_k - ^D V_k}{MV_k} \dots \dots \dots (33)$$

を計算すると、全体の平均は 5.9%, 標準偏差も 5.9% であり、最大値は 24% になっているが、 $K_k > 15\%$ となる頻度は 1 割以下であり、大差の表れる場合は少ない。

次に模擬データによる計算結果について述べる。ここでは水需要水準は 2.0 m³/s に限って、流量の日相関係数による差と流量時系列の標本変動による差について検討した。相関係数による差についてはまず 3 種の相関係数に対する 100 年分 1 ケースずつのデータを用いて、

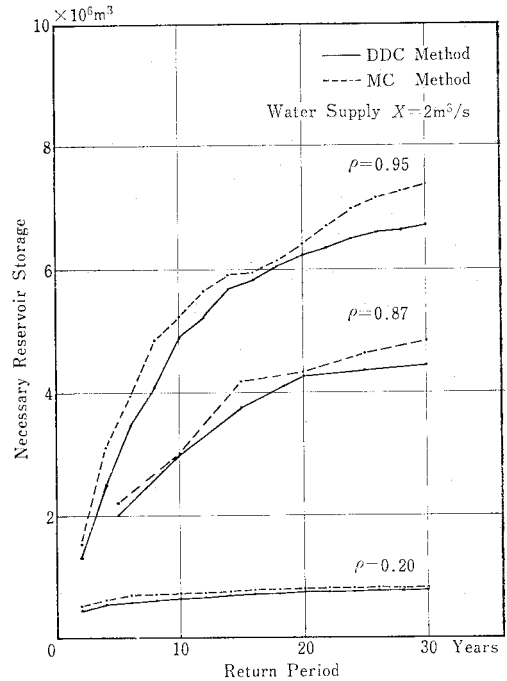


Fig. 4 Comparison of Necessary Reservoir Storages by DDC and MC: constant water supply
—Generated Data with Different Correlation Coefficients—

Fig. 4 を得た。ここで観察されることとしては、第 1 にあらゆる場合について $^D V_k \leq MV_k$ の関係が成り立っていることである。この差 K_k の値は平均 8.5%, 標準偏差 3.8% となっており、身延・万場のケースに比べやや大きな差を示しているが、これは後述の標本変動によるものと、実データと模擬データとの差によるものとの影響と考えられる。第 2 には相関係数が高い方が必要貯水量は大きくなるが、その違いは Fig. 2 と比較すればわかるように取水水準が平均流量の 40% (2 m³/s) から 60% (3 m³/s) に変わる場合に比べはるかに小さいのが興味深い。すなわち流量の相関係数の違いは、取水水準の違いほどには必要貯水量に影響を及ぼさないということである。

次に標本変動について検討するため、相関係数を $\rho = 0.87$ と 0.95 の 2 つの場合について、100 年分 10 ケースずつのデータを発生させ必要貯水量を算定した。水需要水準はやはり 2.0 m³/s に固定した。結果は Fig. 5 に $^D V_k$ を、Fig. 6 に MV_k を示してある。ここでは Fig. 2~4 が 30 年確率までを横軸にとっているのに対し、75 年確率までを取っていることに注意されたい。各点は必要貯水量の標本値であり、実線は各渇水年に対する平均値である。相関係数の違いによる差はいよいよ明確になっているがなお、取水水準の差による影響と比

べれば小さいことがわかる。標本変動はきわめて大きい。各確率年に対して最大と最小の比は 1.5~1.6 になっている。このように大きな差の現れることは、模擬データ発生装置に単純なものをを用いている点を考慮に入れても、偶然性の累積効果を知るに十分である。なお、かかる大きな標本変動も、相関係数による差よりは小さく、したがってまた取水水準による差よりはずっと小さいことは、貯水池の計画・管理上見落してはならない事実である。標本変動が大きいことは、確率洪水年が変動の大きい指標であるということと同義である。したがって対象確率年として 5 年とか 10 年とかを選んで貯水池規模を定めても、それが確かに計画どおりの安全率をもつとは限らないことになる。この事実は貯水池効果を短期的に評価する場合ことに顕著なものである。この対策上最も重要なことは、偶然性の高い過去の資料に基づくにせよ、貯水池容量が決められた限りは、それを所与として効果的操作・運用に力を入れることであろう。

次に Fig. 5 と 6 の差であるが、確率年が 5 年以下の場合を除いてすべて $^D V_k \leq ^M V_k$ なる関係式 (18) が満足されている。平均値でみた差は K_k の値で 5.6%, 標準偏差 5.8% であって、Fig. 4 の場合よりやや小

いが、オーダー的にはほぼ同等である。このことから、水需要水準を一定とした場合の DDC 法による必要貯水量は MC 法による場合に比べ平均で 10% 以下、最大でも 20% 程度以内であるが、小さく算定されると結論できる。これは標本変動による差を大きく下回っており、差のないものとして扱ってよいことを示唆しているといえよう。

ところで Fig. 5, 6 にあっては、確率年 5 年以下のものに対しては $^D V_k \geq ^M V_k$ なる部分があって式 (18) に抵触しているが、これは前節で展開した理論の反証ではない。Fig. 5 を描く際の DDC 法の適用にあたっては非毎年データに基づいて洪水持続曲線を計算しているためにみられる現象である。非毎年データに基づいてというのは、洪水持続曲線 $f_k(m)$ の算出の際、式 (6) のように各年の m 日移動平均流量のうち第 1 位のみを集めてその中の第 k 位最小を $f_k(m)$ に該当させるのではなく、第 2 位・第 3 位など、互いに相重ならない区間より求めた N 年間のすべての順位値の最小値群の中の第 k 位最小を $f_k(m)$ とする方法をいう。

このような非毎年データに基づく DDC 法は、平均日数 m が比較的小さい場合には、ある年の第 1 位最小値

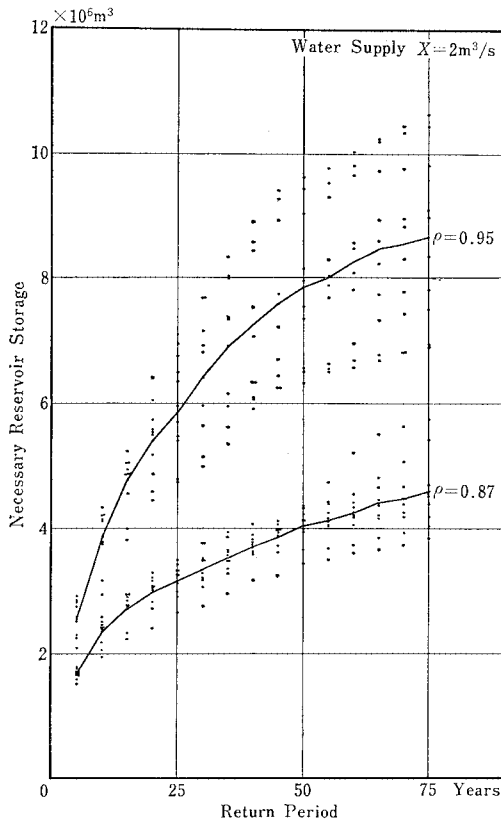


Fig. 5 Sample Variation of Necessary Reservoir Storages by DDC: constant water supply—Generated Data with Different Correlation Coefficients—

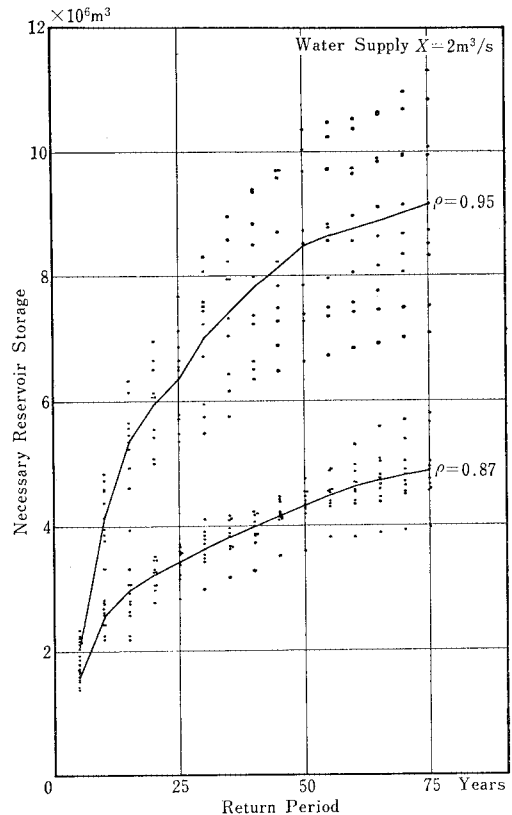


Fig. 6 Sample Variation of Necessary Reservoir Storages by MC: constant water supply—Generated Data with Different Correlation Coefficients—

が他の年の第2・第3位最小にも及ばないこともあるので、最も厳しい m 日平均流量をもとに渇水計画を立てるために施した工夫であって、同様の操作は洪水解析にも用いられている。しかしながら、洪水の場合と渇水の場合とでは、非毎年データを用いる効果が多分に異なっている。それは上記のように m が比較的小さい場合に限ってこの影響があり、 m がある程度大きくなると影響を生じないという事情による注3)。渇水持続曲線の m の大きい値が問題となる場合というのは、確率渇水年の大きい値に対する必要貯水量を算定する場合に相当するから、ある程度大きな確率年に対して算定された必要貯水量は、非毎年データ利用の影響を受けておらず、Fig. 5, 6 の10年確率以上の部分のように式(18)の関係が正しく成立しているわけである。

(2) 水需要に変動のある場合の計算結果

次に水需要に変動があり、その変動は各年一定である場合についての検討に移る。これは式(17)の関係の詳細ということである。需要変動のパターンとしてはFig. 7に示したものをを用いた。これはやや複雑な凹凸をもっているが、その細部に特別な意味はなく、年間を通じて比較的安定した都市用水・工業用水に、6月1日に始まる大量の農業用水需要を合わせたものである。需要水準

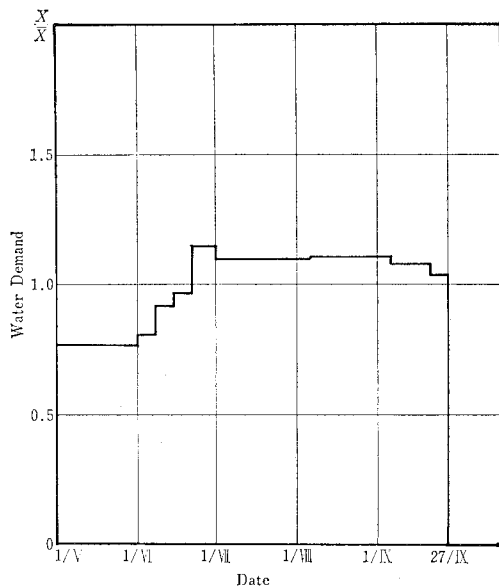


Fig. 7 Water Demand Variation Pattern

注3) これはたとえば2か月というような長期間では、ある年の2か月平均の最小値が、他の年の2か月平均の第2位最小(第1位最小の2か月とは相重ならない区間に対するもの)に及ばないということはまれであるということと、数旬というような短期ではそういうことが頻出するにしても、 N 年間全体のたとえば上位5%とか10%に属する高いランクの渇水に該当するものの間では、それは生じないという両面の事情によっている。

が対象期間内の平均値 \bar{X} で与えられたとき、変動はすべて図のパターン X/\bar{X} に従うものとしている。Fig. 8, 9は、身延ならびに万場データによる計算結果を示したものである。平均給水量としては1, 2, 3 m^3/s を考慮しているため、前掲 Fig. 2, 3 とほぼ同一のオーダー、形態になっている。Fig. 2, 3 と Fig. 8, 9 の根本的差異は DDC 法による必要貯水量 ${}^D V_k$ が、MC 法による ${}^M V_k$ をほとんどの場合上回っているということである。需要変動のない場合の式(18)が成り立っていないことはもちろんであるが、変動のある場合の式(17)の内容は、少なくとも Fig. 7 に示されたような需要パターンの場合には、

$${}^D V_k \geq {}^M V_k \dots \dots \dots (34)$$

ということである。Fig. 7 のパターンは灌漑期・非灌漑期をもつ地域にあっては比較的一般性の高いものであるが、対象期間の取り方の任意性もあり、 ${}^D V_k, {}^M V_k$ の大小の量的詳細についてまで一般化することはできない。しかしながらこの場合に限っていえば両者の差の ${}^M V_k$ に対する比 K_k は平均16%、最大では70%程度であって、DDC法はかなり安全な必要貯水量を与えることがわかる。しかしながら Fig. 8, 9 から一目瞭然であるように、この差を確率渇水年の推定誤差に伴うものであるとみれば、実質的差はずっと小さいといわねばならない。さらに、相関係数(すなわち流域特性)に基

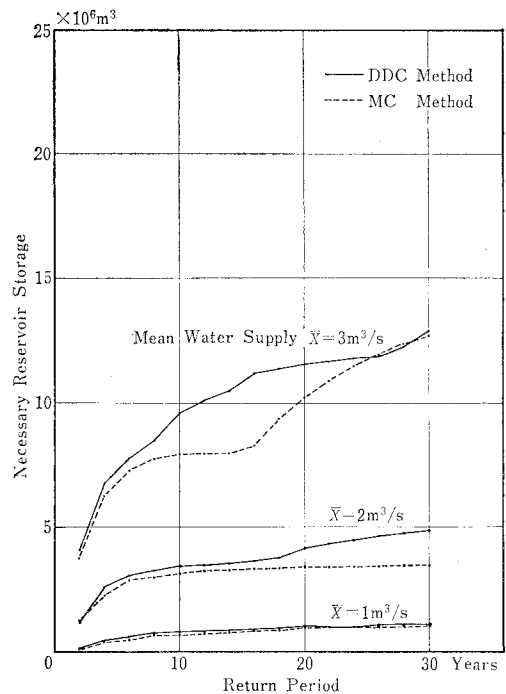


Fig. 8 Comparison of Necessary Reservoir Storages by DDC and MC: varied water supply —Minobu Data—

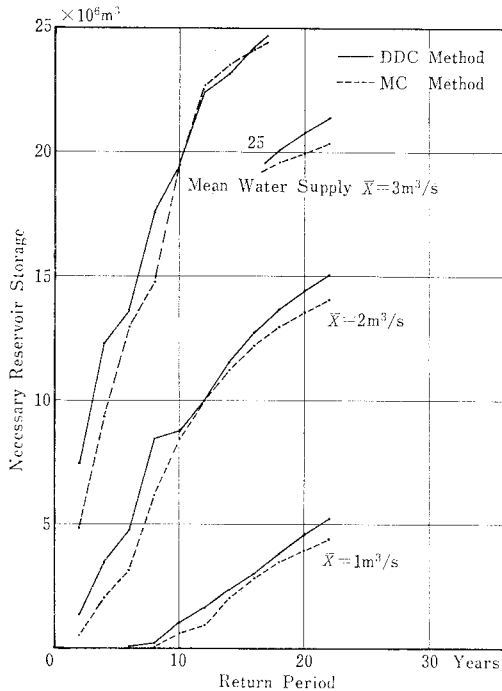


Fig. 9 Comparison of Necessary Reservoir Storages by DDC and MC: varied water supply
—Mamba Data—

づく差や、需要水準の違いからくる差と比べても小さなものである。以上のことから DDC 法は MC 法との対比のうえからも、特別の注意なく代替手法として用いてさしつかえないと結論される。

なお Fig. 2 と 8, Fig. 3 と 9 を詳しくみると、DDC 法では需要変動のある場合は一定の場合に比べ必ず大きな貯水量を示しているが、MC 法にあっては両者の差はほとんどなく、それも大きい場合もあれば小さい場合も両様に存在していることがわかる。これは、DDC 法にあっては式 (9) の定義から需要変動は必ず必要貯水量増につながるのに対し、MC 法では需要・流量の位相の一致・不一致により、需要変動が貯水量増に導く場合も逆に導く場合もあることの現れである。

5. 結 論

本論文では渇水持続曲線法による必要貯水量の算定方式の特徴を明確にするとともに、従来から広く使われているマスカーブ法との差異の詳細を検討し、渇水持続曲線法利用に際して必要な判断材料を提供したものである。以下に明らかにされた主要な結論を列挙する。

(1) 渇水対策上必要な水文情報は、短期的な降雨パターンではなくその長期的な持続特性である。したがって渇水対策のためには本来再現性のない唯一の観測資料

に基づくよりも、その中から抽出された統計要素に基づいた方式を用いるべきである。ここに渇水持続曲線法提案の必然性がある。

(2) 渇水持続曲線は平均日数をパラメーターとして一般化した水文学的渇水指標である。

(3) 渇水持続曲線の算定方式は、降雨を用いる場合でも流量を用いる場合でも実用上は同じでさしつかえない。

(4) 渇水持続曲線法による必要貯水量 DV_k と、マスカーブ法による MV_k との同一渇水年に対する差異は、取水に残流域流出の含まれない場合で、かつ水文状況のおおむね均質な季節に適用する場合には、

① 水需要水準が一定であれば必ず $DV_k \leq MV_k$ となる。しかしながらその MV_k に対する差は、平均 10% 弱、最大でもたかだか 20% 程度である。

② 水需要水準が変動する場合には大小関係不定である。Fig. 7 に示されるような需要パターンの場合には $DV_k \geq MV_k$ となり、DDC 法の方が安全率の高い必要貯水量を与える。この差は MV_k に対し平均 20% 以下程度である。

③ DV_k, MV_k のこの程度の差は流量の日相関係数、需要水準の違いによる差に比べて小さく、必要貯水量の算定に関する限り、DDC 法と従来から用いられている MC 法は実質的内容に大差がない。

(5) 貯水池下流域からの流出をも取水する場合、また確率統計的な性質の異なる複数の季節の流量変動の平滑化を対象とする貯水池に対しては、 DV_k と MV_k の大小関係は理論上は不定である。しかしながら実質的には前項 ②, ③ に準ずる内容が適用できるものと考えられる。このシミュレーションによる検討は行っていない。

(6) (4), (5) の結果から、渇水持続曲線法における渇水年の定義と、マスカーブ法による定義は異質のものであるにもかかわらず、仮に同じ解釈のもとに必要貯水量を算定してもさしつかえないと結論される。なお必要とあれば、水需要一定の計画にあっては渇水持続曲線法を用いる場合には必要貯水量を 1/0.8 倍して安全を期すことも妥当である。

最後に、マスカーブ法利用の立場からいうと不自然ともいえる種々の仮定、たとえば水需要と流量時系列の最悪の位相差を考えるなどの人為的操作を加えてまでも、渇水持続曲線を利用して渇水対策を立案・管理せねばならないのは、これが水文学的により一般化された渇水現象の取り扱いになっていて、自然現象の不再現 (never repeat) の原則にのっとり、かつその統計的性質は十分に活用する手法であること、またそうであればこそ、マスカーブ法では考えられない渇水時の貯水池管理の方法も可能になる (竹内・吉川, 1979) からであるという点

を再確認しておきたい。

参 考 文 献

- 1) 吉川・竹内：渇水持続曲線とその応用，土木学会論文報告集，No. 234, 1975.
- 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.
- 3) 岩井・石黒：応用水文統計学，森北出版，1970.
- 4) 日本河川協会編：改訂建設省河川砂防技術基準（案），日

本河川協会，1977.

- 5) Takeuchi, K. : Regional Water Exchange for Drought Alleviation, Hydrology Paper 70, Colo. State Univ., 1974.
- 6) 建設省河川局編：昭和60年における水需要と水資源開発，日本河川協会，1973.
- 7) 西宮編：身延町の現状と展望，身延町，1979.
- 8) 菅原：流出解析法，共立出版，1972.

(1979.10.12・受付)
