

渇水時における各種利水操作方式の検討

河村 明*・上田 年比古**

A Study on Various Reservoir Operating Rules for Drought Period

Akira KAWAMURA and Toshihiko UEDA

Various operating rules are studied for the water supply component of the already existing Egawa Dam, the biggest multipurpose reservoir in Fukuoka Region. The operation period used in the study is the 1978 through 1979 drought when Fukuoka City was in the midst of the most severe water shortage on record for the city. Operating rules investigated include: (i) an optimum operating procedure determined by Dynamic Programming; (ii) the “when available, release water from storage to fulfill immediate needs” release rule; and (iii) five other operating strategies which employ water supply-demand ratio. (Each of these five strategies has its own method to derive various water supply-demand ratios.) A guiding principle on operating a reservoir during drought is hereby presented.

1. はじめに

近年河川の利用率は次第に増加しつつあり、開発余力は少なく渇水危険度は大きくなっている。この中で水源開発について都市用水の取得は必然的に貯水池に頼らざるをえない状態であり、都市用水の貯水池への依存度は高くなってきている。これに伴って利水上の貯水池の取水操作が重要な課題となっているが、貯水池が異常渇水をうけたときの具体的な運用方式については、従来あまり明確にされたものは少ない。

昭和53年5月から54年3月の約10カ月間にかけて実施された福岡市の給水制限は、影響を受けた給水人口、給水制限期間の長さおよび社会経済に与えた大きさの点で記録的な渇水であったが、このとき、給水制限の時期とその程度について、市水道局は貯水池の残存量と雨量予測とを見比べながら、その決定に苦慮してきたが、これらの事態は貯水池操作の重要さと困難さを如実に示したものと言える。

本報では、昭和53年度の福岡市の大渇水時においてその操作が問題とされた福岡市最大の貯水池容量を有する江川ダムの上水分について、流入量が予測されないものとして、現時点の貯水量のみより貯水池放流量

を算定する各種の利水操作方式を適用し、これと取水ルールを設定しない方式および流入量既知として求めた最良の利水方式を示すDP(ダイナミック・プログラミング)方式による渇水被害値とを比較し、渇水時における貯水池の各種利水操作方式の長所、欠点を比較検討した。

2. 利水用貯水池のモデル化

流域を図-1のようにモデル化し、各変数を離散化しその記号を次のように定めた。第t期に対し、

I_t : 貯水池流入量 q_t : 残流域流入量

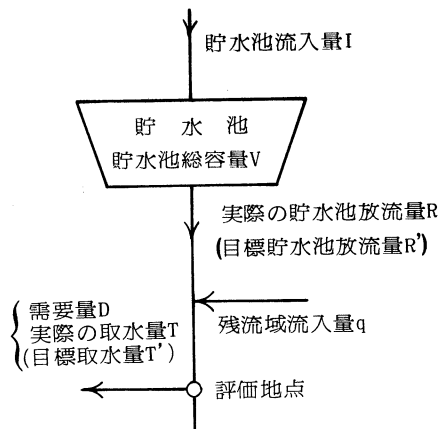


図-1 利水用貯水池のモデル化

昭和58年2月7日 受理
* 水工土木学専攻博士課程
** 水工土木学教室

R_t : 実際の貯水池放流量 R'_t : 目標貯水池放流量
 T_t : 実際の取水量 T'_t : 目標取水量
 D_t : 需要量 S_t : t 期末の貯水量
 S'_t : t 期末の目標貯水量 V : 貯水池総容量
 L_t : 渇水被害値

需要量 D_t , 取水量 T_t , 水不足量 ($D_t - T_t$) は評価地点で計算するものとし, 評価他点における取水量が同地点での需要量を下回ると渇水被害を生じるものと考えられる。渇水被害は単に不足水量の関数だけでなく, その時期の水需要量, 水不足の持続日数, 渇水の波及効果など, 多くの要因が関係してきて, これを簡単な関数で表現することは困難であるが, ここでは一応渇水被害を不足流量の2乗すなわち

$$L_t = \begin{cases} (D_t - T_t)^2 & (\text{if } D_t > T_t) \\ 0 & (\text{if } D_t \leq T_t) \end{cases} \quad (1)$$

と定義する。不足流量の2乗は簡単な指標であるが, 渇水被害の非線形性のある程度よく現わすことができるものと考えられることから, 従来渇水被害関数としてしばしば用いられているものである¹⁾。ここでは渇水期間における(1)式の総和すなわち次の(2)式の最小化を評価基準とした。

$$f_n \cong \sum_{t=1}^n L_t \quad (2)$$

ここに, n : 渇水期間 \cong : 定義

3. 各種利水操作方式

3.1 取水ルールを設定しない場合(ケース1)

この方式は, 行きあたりばったりに要求される水量だけを放流していくもので, 貯水量が要求される水量を下回ったときには貯水量をすべて放流し, さらに貯水池流入量をそのまま放流する方式である。 $R'_t, S'_t, S_t, R_t, T_t$ は次のように計算される。

$$R'_t = \begin{cases} D_t - q_t & (\text{if } D_t \geq q_t) \\ 0 & (\text{if } D_t < q_t) \end{cases} \quad (3)$$

$$S'_t = S_{t-1} + I_t - R'_t \quad (4)$$

$$S_t = \begin{cases} 0 & (\text{if } S'_t < 0) \\ S'_t & (\text{if } 0 \leq S'_t \leq V) \\ V & (\text{if } S'_t > V) \end{cases} \quad (5)$$

$$R_t = S_{t-1} + I_t - S_t \quad (6)$$

$$T_t = R_t + q_t \quad (7)$$

3.2 目標給水率により取水量を決定する方式

この操作方式は第 t 期の目標給水率 α_t ($0 \leq \alpha_t \leq 1$) を定め T'_t を次式とする方式である。

$$T'_t = \alpha_t \cdot D_t \quad (8)$$

このとき実際の取水量 T_t は次式で求められる。

$$T_t = \begin{cases} D_t & (\text{if } q_t \geq D_t) \\ q_t & (\text{if } T'_t < q_t \text{ and } q_t < D_t) \\ T'_t & (\text{if } T'_t \geq q_t \text{ and } T'_t - q_t \leq S_{t-1} + I_t) \\ S_{t-1} + I_t + q_t & (\text{if } T'_t \geq q_t \text{ and } T'_t - q_t > S_{t-1} + I_t) \end{cases} \quad (9)$$

また R'_t は

$$R'_t = \begin{cases} T'_t - q_t & (\text{if } T'_t \geq q_t) \\ 0 & (\text{if } T'_t < q_t) \end{cases} \quad (10)$$

となり, S'_t, S_t, R_t はそれぞれ(4),(5),(6)式で求められる。

(1) 目標給水率を一定とする方式(ケース2)

これは図-2のように貯水量 S がある一定レベル以下になると α_t をある一定の目標給水率 α_c とする方式である。すなわち α_t は次の(11)式で表わされる。

$$\alpha_t = \begin{cases} 1 & (\text{if } S > S_s) \\ \alpha_c & (\text{if } S \leq S_s) \end{cases} \quad (11)$$

ここに,

S_s : 節水開始貯水量 ($0 < S_s \leq V$)

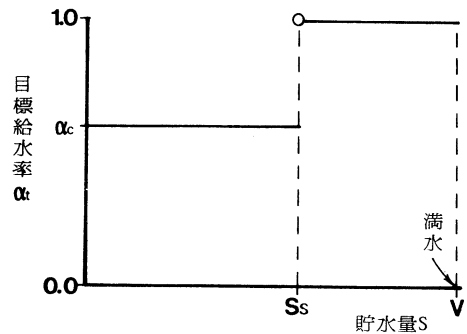


図-2 ケース2の目標給水率

(2) 目標取水量(給水率) T'_t を貯水量の $1/\gamma$ とする方式(ケース3)

すなわち

$$T'_t = \frac{S_{t-1}}{\gamma} \quad (12)$$

ここに、 γ の単位は期間（ここでは旬をとった）である。これは現時点の取水量の $(\gamma-1)$ 期間分だけ、常に貯水量を残存させながら取水する方式である。この場合の目標給水率 α_t は

$$\alpha_t = \frac{T'_t}{D_t} = \frac{S_{t-1}}{\gamma \cdot D_t} \quad (13)$$

とする場合に相当し、これは図-3のような直線関係で α_t を小さくする方式である。図の直線(1)は $V/\gamma \geq D_t$ の場合で、 $S = \gamma \cdot D_t$ から給水量の制限が行われる。また直線(2)は $V/\gamma < D_t$ の場合で、満水時から給水量の制限が行われるもので、やや非現実的ではあるが計算例にとり入れることにした。

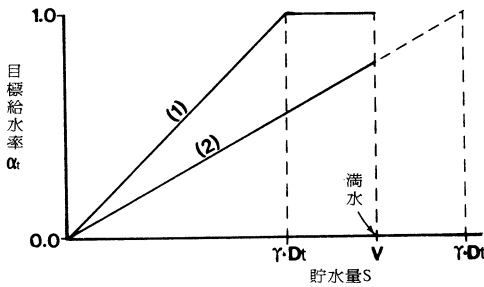


図-3 ケース3の目標給水率

(3) 目標給水率と貯水量との関係を直線とする方式 (ケース4)

これは図-4のように、貯水量が S_s を下回ったとき節水を開始し、 α_t を貯水量の減少に応じて直線関係で小さくする方式であり次式で表わされる。

$$\alpha_t = \frac{1-\alpha_0}{S_s} S_{t-1} + \alpha_0 \quad (14)$$

ここに、

α_0 : 貯水量が空のときの目標給水率

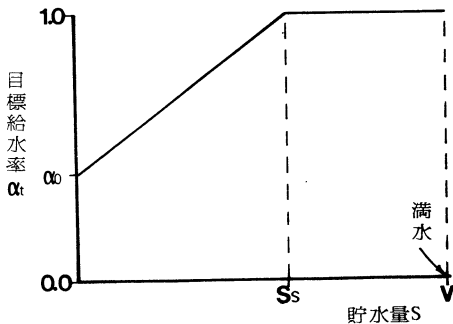


図-4 ケース4の目標給水率

なお、前述のケース3は(14)式で、 $\alpha_0 = 0, S_s = \gamma \cdot D_t$ とした場合に相当する。

(4) 目標給水率式(14)の S_s にK期先までの総需要量を用いる方式(ケース5)

すなわち

$$\alpha_t = \frac{1-\alpha_0}{\sum_K D} S_{t-1} + \alpha_0 \quad (15)$$

ここに、

$$\sum_K D \triangleq \sum_{i=0}^{K-1} D_{t+i} \quad (16)$$

なお、ここでは $\sum_K D > V$ の場合も考えることにする。

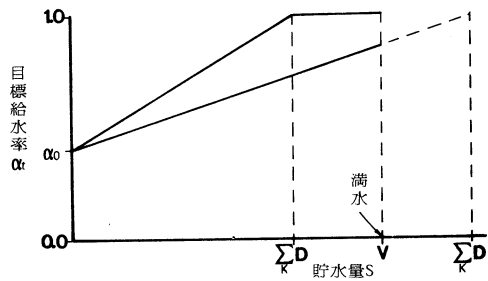


図-5 ケース5の目標給水率

(5) 目標給水率を将来の流入量を考慮して決定する方式²⁾(ケース6)

これはK期先までの流入量の総和を推定してこの流入量の総和と現貯水量よりK期間使用可能量 w_K を次の(17)式のように算定し、この w_K がK期先までの総需要量 $\sum_K D$ を下回ると節水を開始する方式で、 α_t は(18)式のように w_K と $\sum_K D$ の比で与える。

$$w_K = \sum_K (I+q) + \beta \cdot S_{t-1} \quad (17)$$

$$\alpha_t = \frac{w_K}{\sum_K D} = \frac{\sum_K (I+q)}{\sum_K D} + \frac{\beta}{\sum_K D} S_{t-1} \quad (18)$$

ここに

$\sum_K (I+q)$: K期先までの貯水池流入量と残流域流入量の総和

$$\sum_K (I+q) \triangleq \sum_{i=0}^{K-1} (I_{t+i} + q_{t+i}) \quad (19)$$

$\beta \cdot S_{t-1}$: 現貯水量 S_{t-1} からK期間で使用可能な水量 ($0 \leq \beta \leq 1$)

この α_t と貯水量の関係は図-6ようになる。

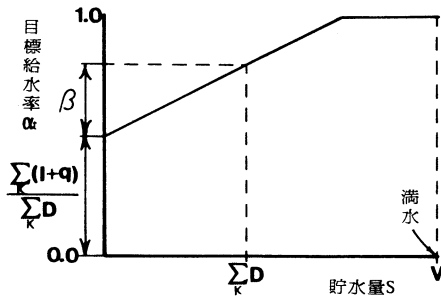


図-6 ケース6の目標給水率

3.3 ダイナミック・プログラミング法(DP法) (ケース7)

この方式は渇水期間中の I と q を既知として、OR手法の一つである DP 法を適用するもので、 I と q が既知の場合の貯水池の最適取水操作といえる(詳しくは参考文献3)を参照)。これは現実には I と q の予測が不可能なことから、実際には不可能な理想的な取水操作であるが、渇水被害 f_n は最小となる。

4. 実流域への適用例

4.1 適用流域

適用ダムは江川ダムである。これは福岡市最大の貯水池容量を有するダムで、ダムの流域面積 30.0 km^2 、残流域面積 30.0 km^2 、有効貯水容量 2400 万 m^3 、福岡市上水貯水容量 787 万 m^3 である。この流域の利水概要図を図-7に示す。いまその利水条件の概要をのべると、小石原川は河川維持用水として常に $0.44\text{ m}^3/\text{s}$ ($0.35\text{ m}^3/\text{s}$ のこともある) は流さなければならない。

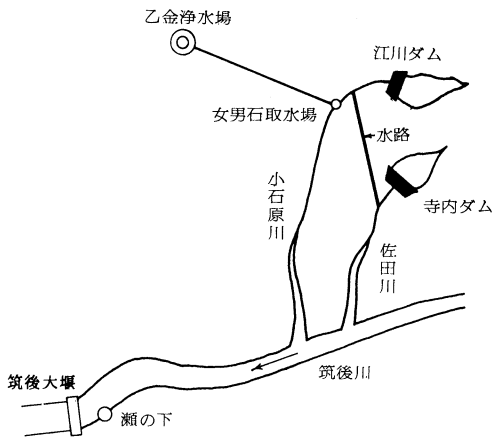


図-7 江川ダム利水概要図

また瀬の下での流量が $40\text{ m}^3/\text{s}$ を下回るときには、貯水池流入量をダムに貯留できない。しかしこの場合は貯留できないだけであり、女男石取水場からの取水は構わない。さらに瀬の下での流量が $40\text{ m}^3/\text{s}$ 以下の場合、佐田川での河川維持用水 ($0.22\text{ m}^3/\text{s}$) を確保しても、寺内ダムの貯水池流入量に余裕がある場合には、小石原川と佐田川を結ぶ水路によって水を佐田川から小石原川へ流域変更を行って女男石取水場で取水することが可能である。なおその逆への流域変更も可能である。

4.2 各変数の設定

計算期間は昭和53年度の福岡市大渇水の前後で江川ダムの貯水量がほぼ満水となっている期間すなわち昭和52年6月中旬より昭和54年8月中旬の2年2カ月間とした。需要量は、制限給水期間中である昭和53年2月20日より54年3月25日は計画配水量を需要量にとり、それ以外の期間については評価地点での実際の取水量を需要量とした。残流域流入量 q としては、寺内ダムからの流域変更分を考慮し、また河川維持用水として評価地点下流へ流した量は差し引き、さらに瀬の下での流量が $40\text{ m}^3/\text{s}$ を下回り貯留制限が行われたときにはその日の I は q として考え、図-1のモデルに適合するようにした。各変数の離散化は単位期間に旬、単位水量に 10 万 m^3 、単位流量を $10\text{ 万 m}^3/\text{旬}$ とした。この結果江川ダム上水分容量 $V = 79(\times 10^6\text{ m}^3)$ 、計算期間内の需要量の平均 $\bar{D}_t = 6.67(\times 10^6\text{ m}^3/\text{旬})$ となった。

4.3 適用結果^{4),5)}

以上のようにして、福岡市で大渇水の生じた昭和53年、54年における江川ダム上水分について、2.において定式化した各種の利水操作を適用した。ここでケース2の S_s 、 α_c 、ケース3の γ 、ケース4の S_s 、 α_0 、ケース5の α_0 、 K 、ケース6の β 、 K はパラメーターであり、計算期間内の渇水被害値の総和 f_n はこれらの関数となるので、これらのパラメーターと f_n との関係を図-8~図-12に示す。なおケース2、4の S_s は79(満水)、60、40、20 ($\times 10^6\text{ m}^3$)、ケース5の K は9、12、15、18(旬)、ケース6の K は3、9、12、15(旬)について計算を行い、ケース5、6の需要量は既知とし、ケース6の将来流入量 I および q は実績値を与えた。

次に、計算期間終端(渇水期間の終端)の各ケースにおける貯水量 S_e について考えると、計算期間に続

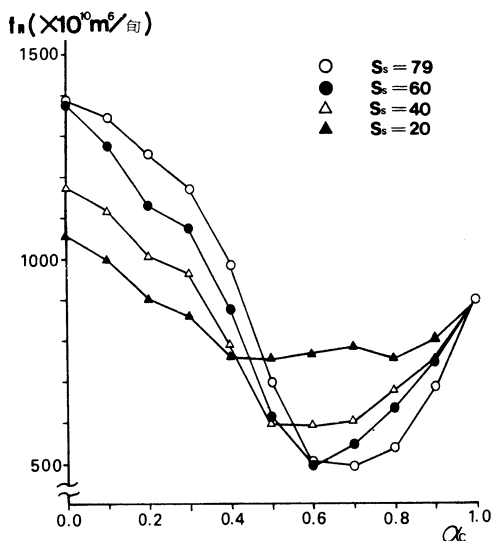


図-8 ケース2の渇水被害値

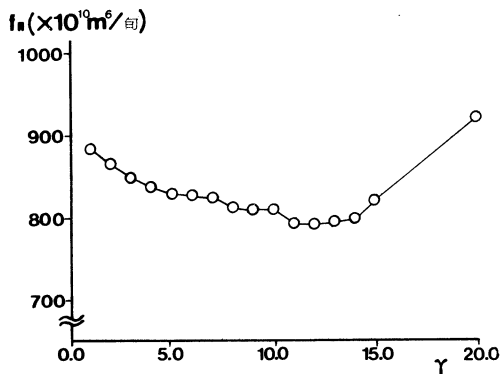


図-9 ケース3の渇水被害値

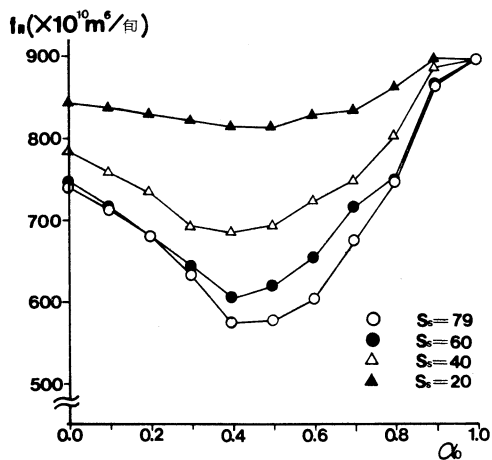


図-10 ケース4の渇水被害値

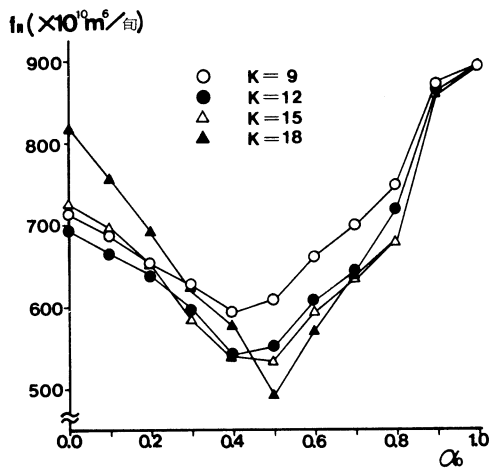


図-11 ケース5の渇水被害値

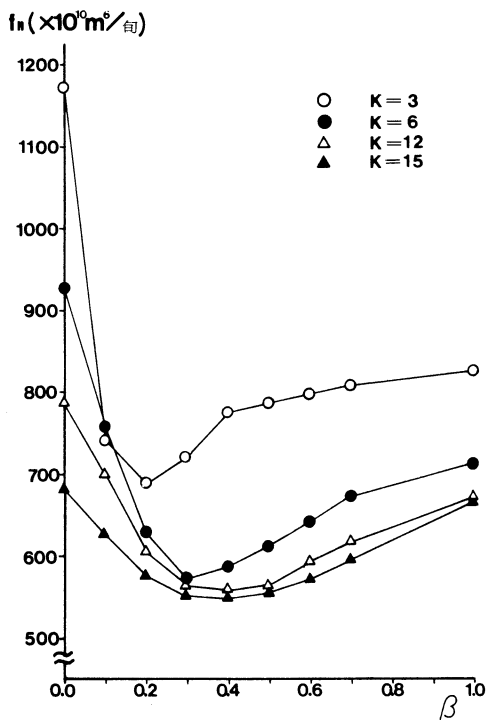


図-12 ケース6の渇水被害値

く後の期間に対しては安定給水上から S_e は大きい方がよいが、一方 S_e が大きくなる程、計算期間における渇水被害値は大きく算出される。したがって取水操作は、なるべく S_e は大きく f_n は小さい程よい。いま各ケースを比較検討するにあたり、まず図-8～12で渇水被害の最小になる場合を各ケースについて1つずつ

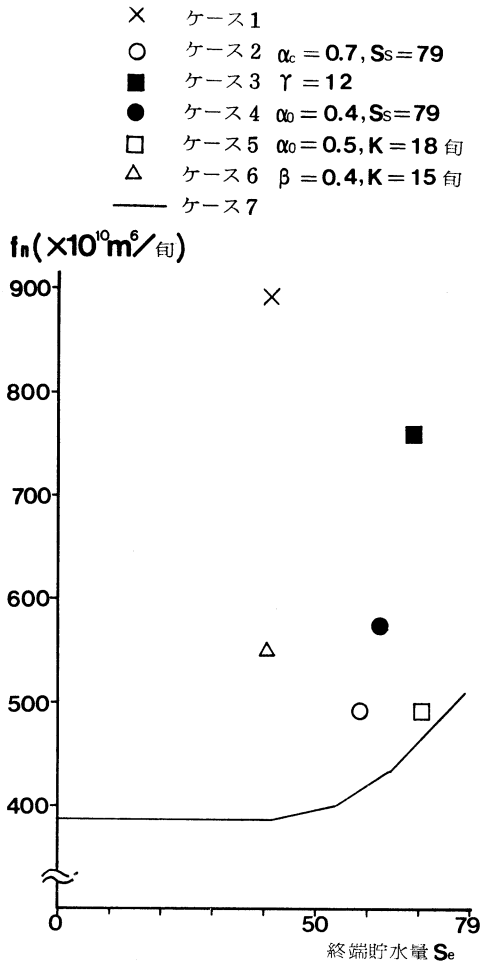


図-13 各利水操作方式の渇水被害値

とり出し、この場合の渇水被害値 f_n をそのときの終端貯水量 S_e について図示した。これを図-13に示している。

5. 考 察

ケース1の取水ルールを設定しない場合は終端貯水量 S_e も小さく計算期間内の渇水被害値の総和 f_n も他の方式に比べ最大で、今回の場合最悪の方式となっており、やはり何らかの運用方式に従って計画的に取水を行わなければならないことがいえる。

ケース2からケース6までの f_n が最小となるパラメーターをみると、これらはすべて満水時より節水を開始する場合となっている。実際問題として満水時よ

り節水運用を行うことは考えられないが、今回の大渇水の場合においては節水に着手する貯水量（節水開始貯水量）をなるべく大きくした方が f_n が小さくなった。これは今回の渇水が異常な大渇水のためと考えられ、渇水規模により節水開始貯水量は異なるものと考えられる。

ケース2は簡単な操作であるにもかかわらず結果は良好であるが、これは(1)式のような渇水被害関数を与えているので、可能な限りある最適の一定の目標給水率 a_c で取水した方が f_n が小さくなるからである。今回の場合 $a_c = 0.7$ が最適となったが、この値は渇水規模が大きくなるに従って小さくした方がよいと考えられるが、この一定の目標給水率 a_c を前もって推定するのは難しい。しかも図-8のように a_c により f_n が大きく変動しているので、この推定を誤ると f_n も急激に大きくなる。したがってこの方式は実用的ではないと考えられる。

ケース3は図-9,13のようにパラメーターによる変動は小さく S_e も大きい、 f_n がかなり大きく劣った操作であるといえる。これは図-3,4,5よりケース4,5において a_0 を0とした場合に相当し、自由となるパラメーターが γ だけであり、貯水量が小さくなると目標給水率 a_c を急激に小さくして放流量を小さく抑え貯水池への貯留を大きくするので、その結果取水量は小さくなり S_e が大きくなる反面 f_n も大きくなるものと考えられる。

ケース4は比較的簡単で実際的な操作であり、図-10,13のように f_n はかなり小さくまたパラメーターによる f_n の変動も小さく、今回の場合比較的良好な操作といえる。

ケース5は今回の場合ケース7の最適操作を除き f_n は最小となっている。これはケース5では図-5のように K を大きくすることにより満水時からでも急激な節水ができる方式となっているため、満水時から徐々にしか節水できないケース4を発展させたものとなっているためといえる。事実この場合 $K = 18$ 旬で f_n が最小となる。この場合 $\sum_n D = 120 > V = 79$ となり、これは満水の時点からかなり低い給水率で節水を行うことを意味している。

ケース6はパラメーターによる f_n の変動も大きく、また他の方式に比べ複雑でしかも15旬先までの流入量の実績を与えた割には f_n は小さくはならず S_e も小さい。したがって今回の場合良好な取水方式とはいえない。

ケース7はDP法による最適取水方式であり、図-13のように f_n は他のケースに比べて最小の値を示している。なお S_e をほぼ50位から大きくしようとするとき f_n も急激に大きくなる。これは S_e を大きくするために途中でかなりの節水を行わなければならない結果と考えられる。

6. むすび

昭和53年度の福岡大渇水時の江川ダム上水分について各種の利水操作方式を適用しそれらの渇水被害値を算定した。その結果、流入量既知としてえられる最適操作のDP法と比較して、 K 期先までの総需要量と現貯水量とから給水率を決めるケース5が今回の場合適切な操作方式となった。なお、今回の各利水操作における渇水被害およびこれを最小とする各パラメータの値は、対象流域、対象ダム、渇水規模、渇水期間、渇水被害の評価法が異なれば当然変ってくる可能性があるが、大渇水に対する貯水池の利水操作の一つの指

針になりうると考えられる。

終りに、貴重な資料を提供して頂いた福岡市総務局水資源対策室の各位に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 萩原・中川・辻本：渇水被害の計量化と貯水池群運用について、第15回衛生工学研究討論会講演論文集，pp. 181-186, 1979.
- 2) 中村昭：ダムによる長期流況制御について、水資源シンポジウム前刷集，pp. 303-308, 1977.
- 3) 上田・河村：単一貯水池の最適利水操作の算定法に関する一試案，九大工学集報，第52巻，第5号，pp. 579-582, 1979.
- 4) 上田・河村：単一貯水池の渇水時における利水操作の検討，土木学会西部支部研究発表会講演集，pp. 203-204, 1980.
- 5) 上田・河村・石本：渇水時における単一貯水池の各種利水操作方式の比較検討，土木学会西部支部研究発表会講演集，pp. 135-136, 1981.