

渇水持続曲線の改良

Refinements to Drought Duration Curves

渡辺和好* 星 清**

Kazuyoshi WATANABE and Kiyoshi HOSHI

前報¹⁾において、積雪寒冷地における渇水時のダム運用手法を検討した。その結果、DDC ルール・カーブの有効性が明らかになった。しかしながら、実用化に際して

- ①貯水池容量を無限大としている。
 - ②最適な季節早遅の考慮期間 s の設定方法が不明確である。
- などの問題が残されていた。

本報告では、これらの問題点の解決法を示し、DDC ルール・カーブが実用に耐えることを明らかにした。

また、ハースト現象と呼ばれる流量時系列の長期的持続性が、DDC に及ぼす影響についてモンテカルロ法を用いたシミュレーションを行った。その結果、積雪寒冷地においては、DDC に与えるハースト現象の影響は無視できるとの結論を得た。

《ダム運用ルール；ハースト現象；DDC；モンテカルロ法》

In a previous report, the authors examined the most appropriate reservoir operating rule in regions where snowmelt runoff accounts for a large part of the annual runoff, the water saving rule and Drought Duration Curve (DDC) rule.

The objective of the current work is to refine the DDC rule with the finite reservoir size incorporated.

The long-term persistence of a hydrologic time series, well known as the Hurst phenomenon is of practical importance to determine the operating rule in drought periods.

The present study also examines the impact of the Hurst coefficient and the lag-one serial correlation coefficient of the annual runoff on the DDC rule via Monte Carlo simulation methods.

Keywords; reservoir operating rule, Hurst phenomenon, Drought Duration Curve, Monte Carlo method.

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。今後も水需要はさらに増加すると予想される。この水需要の大部分を主として河川水に依存している。河川水量は降雨量と密接な関係を持ち、かなり変動する。

*環境研究室員 **前河川研究室長 現局長官房技術開発室長

このような不安定性に対処し、水の安定供給を目的としてダム建設が推進されてきたが、いまだ十分とはいえないのが現状である。そのため、各地で渇水が発生し、その被害は増加の一途をたどっている。このような現状をふまえ、既存のダムを適切に運用することにより渇水被害を軽減する方法がないかを前報『地域特性を考慮し

たダム運用ルールに関する一考察¹⁾で検討した。その結果、北海道のような積雪寒冷地においては、DDCルール・カーブが有用であることが明らかになった。しかしながら、①貯水池容量を無限大としている、②最適な季節早遅の考慮期間の設定方法が不明確、③最適運用ルール決定データと検証データが同一などの問題が残った。さらに、ハースト現象がDDCルール・カーブに影響を与える可能性が指摘されている。^{3),4)} 本報告では、これらの問題について検討を加え解決法を示すものである。

2. DDCルール・カーブとその問題点

(1) DDCルール・カーブ

DDC (Drought Duration Curve: 渇水持続曲線)ルール・カーブ²⁾とは、山梨大学の竹内教授らによって提案された渇水時の貯水池管理手法の1つであり、今後 N_s 時間間隔内に貯水池が涸渇しないために、 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。DDCルール・カーブの特徴およびその計算例は、すでに前報¹⁾に詳しく記述してあるので参照されたい。以下に季節別DDCを用いて、ダム運用のためのDDCルール・カーブの基本的考え方のみを示す。

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。季節別DDCは①式で求められる。

$$f_k(m|\tau) = k\text{-th smallest} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\left\{ \min_{(j, \tau - \frac{s}{2}) \leq t_i \leq (j, \tau + \frac{s}{2})} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=h}^{h+m-1} q_i \right) \right\} \dots \dots \dots \text{①}$$

ここに、 $f_k(m|\tau)$: 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 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_i : 流量, n : 流量資料のある年数

①式で表わされた季節別DDCを用いて、 τ 時点から始まる m 時間目の想定流入量は②式で求められる。

$$\bar{q}_k(m|\tau) = f_k(m|\tau) \cdot m - f_k(m-1|\tau) \cdot (m-1) \dots \dots \dots \text{②}$$

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

季節別DDCの危険率は③式により求められる。

$$P_k = \frac{k}{(n - N_s) + 1} \dots \dots \dots \text{③}$$

ここに、 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位,
 n : 資料年数,
 N_s : 渇水を考慮する時間間隔

τ 時点で確保しておかなければならない貯水量は④式で与えられる。

$$V_k(\tau, \alpha) = \max_{1 \leq n \leq N_s} \left[\sum_{m=1}^n \{ (1 - \alpha) \cdot W(m|\tau) - \bar{q}_k(m|\tau) \} \right] \dots \dots \dots \text{④}$$

ここに、 $V_k(\tau, \alpha)$: 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
 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・カーブとなる。④式によるDDCルール・カーブにおいては、節水率 α を変化させることにより渇水に対応することができ、しかも貯水池で確保すべき下限の貯水量を与える。

(2) DDCルール・カーブの問題点

DDCルール・カーブの問題点について、以下に述べる。

①無限大貯水池の仮定

DDCルール・カーブのモデルの中に、実際の貯水池容量に関する情報が含まれていないため、無限大の貯水池を仮定していることになる。

②季節早遅の考慮期間 s の設定方法

季節早遅の考慮期間 s をある気象指標の最早と最晩の差によって決定してきた。前報¹⁾では、気象指標として長期積雪、降霜、梅雨などを考えたが、これらの指標の最早と最晩の差は、 s のとり得る範囲の上限を示すもので、貯水池運用上最適となる s は、その値より小さくなる可能性がある。

3. 流量データの問題点

前報¹⁾の検討において、貯水池運用ルールとして、段階節水ルールとDDCルール・カーブの2つのルールについて検討を行った。その検討において、いずれのルールも最適運用ルールは、過去の実測流量データをもとにパラメータを変化させ渇水被害が最小となる値を求め、最適運用ルールを決定した。この最適運用ルールを求め

る流量データと運用効果を求める流量データが同一であった。これは、流量データの観測年数に起因するものであるが、わが国では流量データは50年程度しか存在していない。本来、最適運用ルール設定用データと運用効果検証データは別なものであることが望ましく、この点が課題となっていた。

また、DDCは水文時系列の長期的持続性に支配されるが、この長期的持続性を持つ現象であるハースト現象との関係が指摘されている^{3),4)}。

4. 改良 DDC ルール・カーブの検討

(1) 問題点の解法

① 無限大貯水池の仮定

貯水池容量を考慮するため、以下の操作を行う。

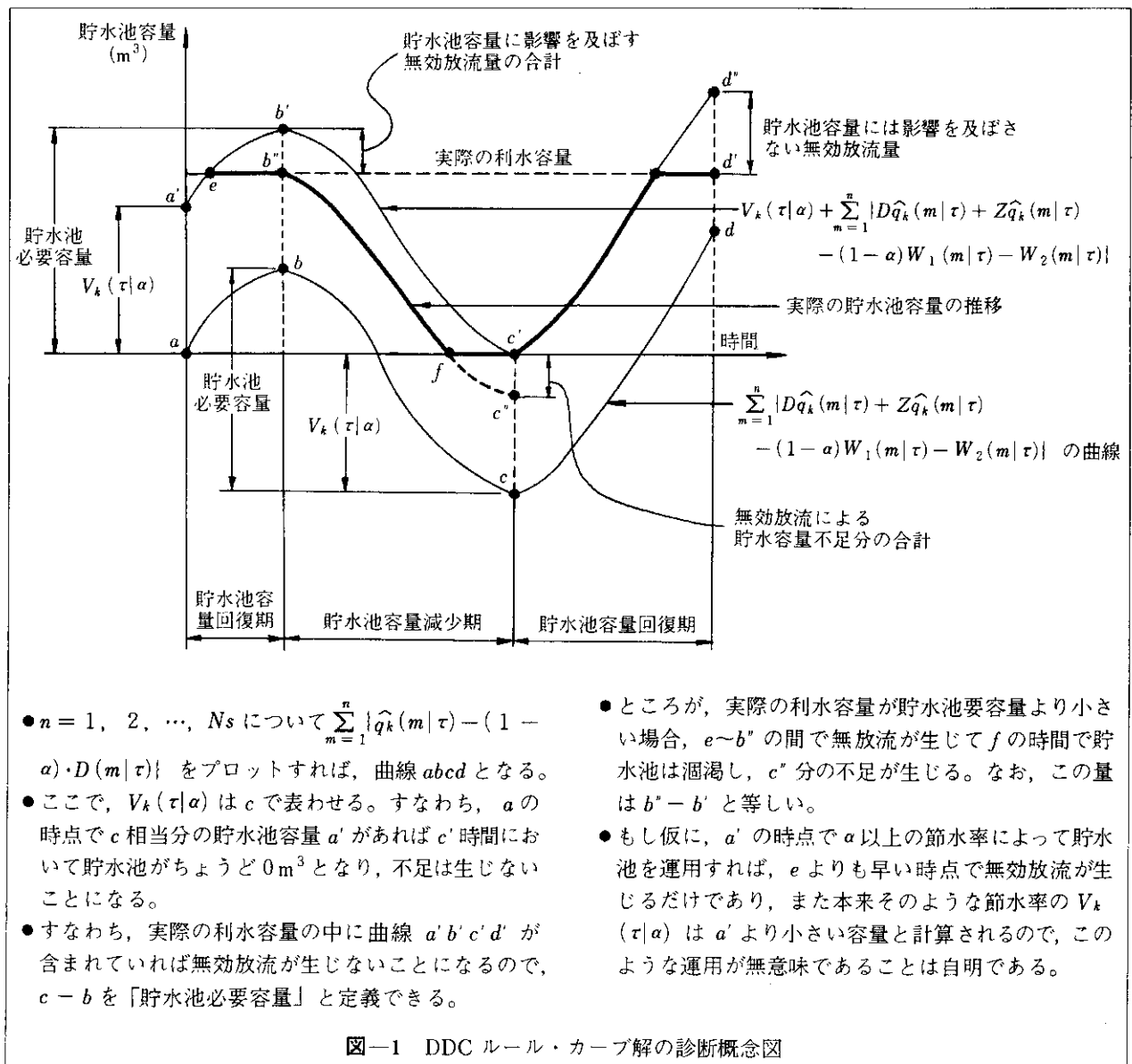
①④式の τ 時点で確保すべき貯水量 $V_k(\tau|\alpha)$ を求め

る。従来はこの $V_k(\tau|\alpha)$ をそのまま解としていた。

② $V_k(\tau|\alpha)$ の貯水池容量から N_s 期間の水収支計算を行い、実際の貯水池容量の制限による無効放流の発生によって貯水池が涸渇していないかチェックする。

③②において無効放流のために貯水池の涸渇が生じているときには、 $V_k(\tau|\alpha)$ の解が実は存在していないことを意味する。また、 $V_k(\tau|\alpha)$ が実際の利水容量を上まわっていても、その時点で $V_k(\tau|\alpha)$ の解は存在しないことになる。

④ $V_k(\tau|\alpha)$ の解が存在しないケースでは、さらに大きな節水率 α の水準に貯水池が低下するまで待期して、その時点で強い節水を行っても、渇水が最も深刻となる時点での貯水池容量は等しくなる。すなわち、この診断を実施した方が無効な節水を実施しなくなる分だけ効率が上がる。以上の概念を図-1に示す。



② 季節早遅の考慮期間 s の設定方法

気象指標を用いて設定した季節早遅の考慮期間 s は、 s のとりうる範囲の上限を示すもので、貯水池運用上最適となる s がほかに存在しうる可能性がある。そこで、 s を 0, 2, 4 と変化させ、それぞれに対応する DDC ルール・カーブを計算し、後で述べる模擬発生流量によって運用効果の比較を行い、最適な s を検討した。

(2) 改良 DDC ルール・カーブの作成

解析対象地域として豊平川流域を設定した。計算期間は昭和 26 年から昭和 62 年までの 36 年間、計算時間単位は旬単位とした。ダム運用効果の判断基準となる利水安全度指標は、 $\sum \{(\text{不足}\%)^2 \cdot \text{日} \cdot \text{不足量}\}$ を用いることとした。

また、水需要構造の違いが貯水池運用効果にどのように影響を及ぼすかを把握するため、水需要構造としては都市用水型と農業用水型の 2 タイプを設定した。都市用水型は現況の豊平川流域の水需要構造であり、農業用水型は豊平川の水需要構造を農業型に変換したものである。図-2 に、都市用水型と農業用水型の水需要構造を示す。水需要のうち都市用水型は年間をとおしてほぼ一定、農

業用水型はかんがい期に集中する構造となっている。水需要構造の変換方法は、前報¹⁾で農業用水型の解析対象地域とした吉野川の構造に、豊平川と吉野川の年間総流量の比を乗じたものである。

さらに、DDC ルール・カーブの運用効果をより明確にさせるために、節水を行わない場合と段階節水ルールを貯水池運用ルールとして用いた場合についても計算を行い比較した。ここで、段階節水ルールとは節水率を貯水池の残貯水量のみによって一意的に決定する方法である。最適な段階節水ルールとは、パラメータとなる節水ピッチ、最大節水率、節水開始貯水率を種々変化させ、シミュレーション期間中の渇水被害を最小とするルールである。

(3) 改良 DDC ルール・カーブの計算結果

36 年間の実測流量資料を基に、正常流量パターン別、節水運用ルール別の各種利水安全度指標を計算した。結果を表-1、図-3、4 に示す。

各節水ルールにおける最適運用ルールの決定方法を、都市用水型、 $s = 0$ の条件における DDC ルール・カーブを例に示す。図-3.1 の縦軸が渇水被害関数、横軸が渇水

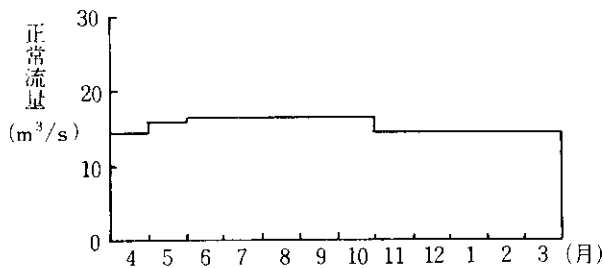


図-2.1 都市用水型

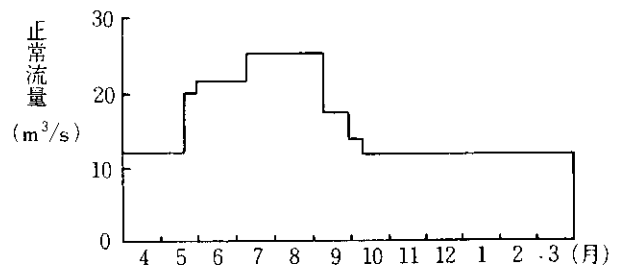


図-2.2 農業用水型

表-1 節水ルール別利水安全度指標一覧表

正常流量パターン	計画利水(都市用水型)					変更利水(農業用水型)				
	節水なし	段階節水ルール	DDC ルール・カーブ			節水なし	段階節水ルール	DDC ルール・カーブ		
			$s = 0$ (旬)	$s = 2$ (旬)	$s = 4$ (旬)			$s = 0$ (旬)	$s = 2$ (旬)	$s = 4$ (旬)
パンク日数	301	21	0	0	0	623	132	20	20	20
不足流量 (m³/s・日)	2330	10897	4135	4807	5586	3032	8369	6489	6386	6323
不足%・日	16777	77474	28980	33670	39075	23663	61781	38712	38705	37958
(不足%)²・日	977271	1146811	470000	566500	673925	1082716	990021	708660	734146	770510
渇水被害関数(×10³)	8143	2954	1353	1693	2082	6860	3026	2386	2565	2758
節水なしを100とした場合の渇水被害関数(%)	100	36	17	21	26	100	44	35	37	40
最適節水ルール	—	最大節水率30% 節水開始貯水率 90%	渇水確率 7年	渇水確率 7年	渇水確率 7年	—	最大節水率20% 節水開始貯水率 70%	渇水確率 9年	渇水確率 7年	渇水確率 5年

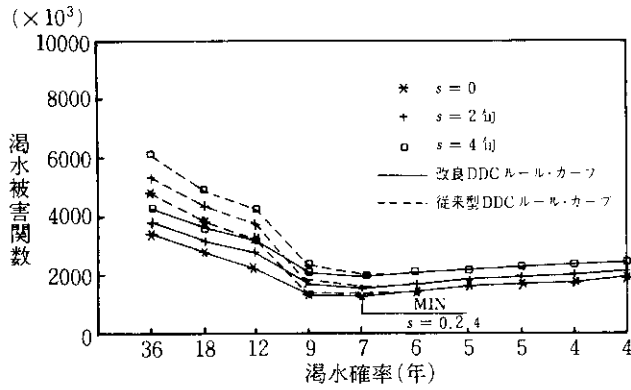


図-3.1 都市用水型での運用

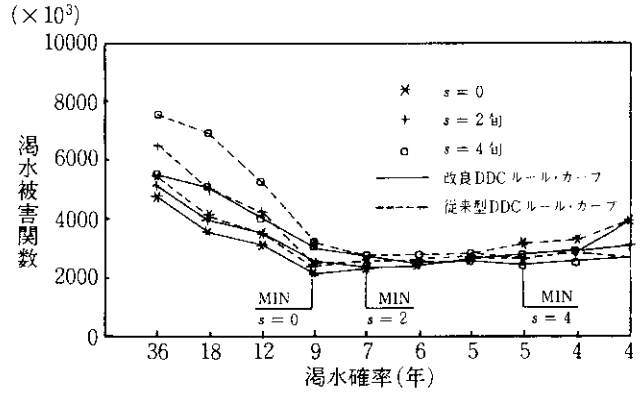


図-3.2 農業用水型での運用

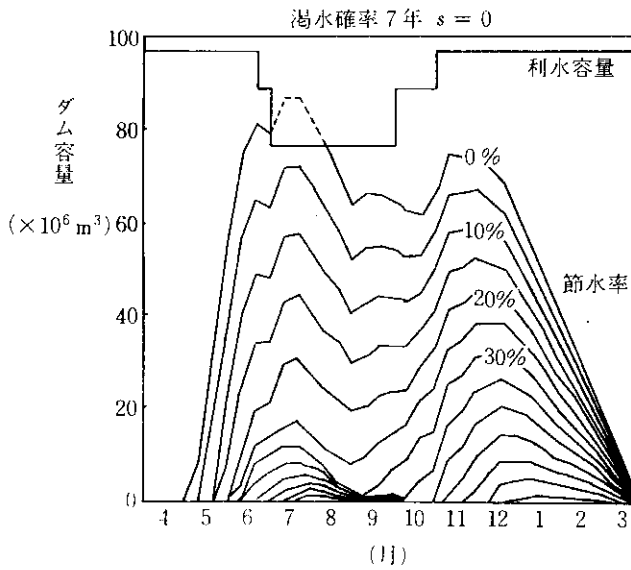


図-4.1 DDCルール・カーブ(都市用水型)

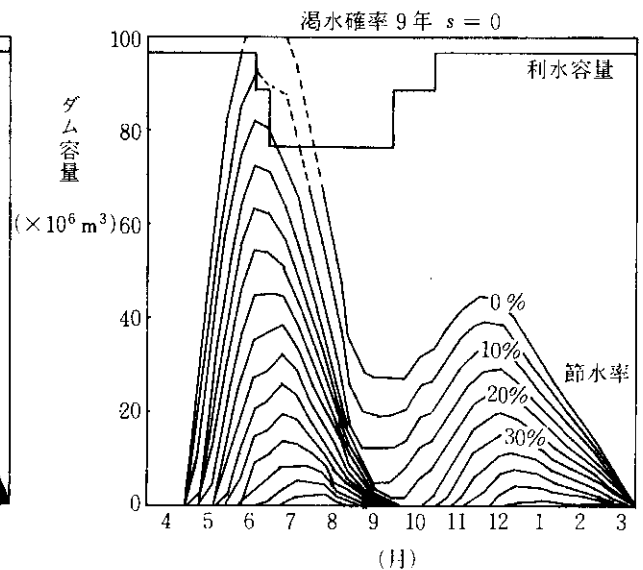


図-4.2 DDCルール・カーブ(農業用水型)

確率年, $s = 0$ の改良 DDC ルール・カーブは実線の「□」記号で表わされる。各渇水確率年における渇水被害関数をプロットすると、最適運用ルールは渇水被害関数が最小となる渇水確率年 7 年における DDC ルール・カーブとなる。このときの DDC ルール・カーブを図-4.1 に示す。縦軸がダム容量、横軸が月を表わしている。図中の点線部分が改良点となっている。従来の DDC ルール・カーブでは、点線部分では確保容量が利水容量より大きいため、節水を行うことになっていた。本検討では節水を行わず、ダム水位が利水容量を下まわった場合のみ節水を行うものとしている。

節水ルール別、正常流量別の運用効果を表-1 の「節水なしを 100 とした場合の渇水被害関数」を基に述べる。

節水ルール別の運用効果は、都市用水型、農業用水型のいずれの場合においても DDC ルール・カーブ、段階節水ルール、節水なしの順になっている。

正常流量パターンでみると、農業用水型では 100 が 35 になるのに対し、都市用水型では 100 が 17 となっており、

農業用水型よりも都市用水型の方が運用効果が高いといえる。

また、DDC ルール・カーブにおいて季節早遅の考慮期間 s は小さいほど、つまり $s = 0$ のとき運用効果が高い。さらに図-3 において、 s がいずれの場合においても用水型の違いにかかわらず、改良 DDC ルール・カーブは従来型 DDC ルール・カーブよりも渇水被害関数は小さくなっている。これは、無効な節水を抑制する改良 DDC ルール・カーブは従来型 DDC ルール・カーブよりも運用効果が高いことを示している。

5. 模擬流量の作成

貯水池運用の最適ルールを検討するためには、長期間の流量データが必要である。しかしながら、流量データは通常 50 年程度しか存在しない。この問題を克服するため、実測データと同等な統計的・時系列特性を有する長期流量時系列を模擬発生させる。模擬発生させた流量を用いて運用を行い、運用効果を確認することとする。

表-2 年流量時系列の統計値(80年間×500回)

統計値	平均値 (m ³ /s・日)	標準偏差 (m ³ /s・日)	ひずみ度	自己相関係数 ρ_1	ハースト数 K
実測流量	9045	1341	0.60	0.13	0.69
マルコフ ジェネレータ	9047	1431	1.46	0.15	0.66
	205	222	0.62	0.11	0.06
	0.09	0.56	1.08	0.09	0.12
ARMA ジェネレータ	9063	1445	1.46	0.16	0.71
	286	254	0.61	0.13	0.07
	0.43	0.67	1.73	0.05	-0.23

※上段：平均値，中段：標準偏差，下段：ひずみ度

表-3 節水ルール別・ジェネレータ別洪水被害関数計算結果一覧表(80年×500回)

(×10³)

正常流量パターン	計画利水(都市用水型)					変更利水(農業用水型)				
	節水なし	段階節水ルール	DDCルール・カーブ			節水なし	段階節水ルール	DDCルール・カーブ		
			$s=0$ (旬)	$s=2$ (旬)	$s=4$ (旬)			$s=0$ (旬)	$s=2$ (旬)	$s=4$ (旬)
実測流量	18096 100	6564 36	3007 17	3762 21	4627 26	15244 100	6724 44	5302 35	5700 37	6129 40
マルコフ ジェネレータ	13125 100	6768 52	2241 17	2731 21	3533 27	13699 100	7705 56	4928 36	5081 37	5315 39
ARMA ジェネレータ	13221 100	6648 50	2188 17	2685 20	3474 26	13313 100	7707 58	4924 37	5049 38	5267 40

※上段：80年の合計値，下段：節水なしを100とした場合の洪水被害関数(%)
※実測流量については80年相当に補正した。

模擬発生の方法としては⁵⁾，通常最も多く用いられているマルコフモデル(自己回帰モデル)とハースト現象を考慮したARMAモデルを用いることとした。ハースト現象とは，長期的持続性を持つ現象をいう。つまり，マルコフモデルでは現在の値は過去の有限な値だけに関係するが，ARMAモデルでは過去の長い観測値に依存するとする考え方である。

マルコフモデルおよびARMAモデルを用いて発生させた年流量は，disaggregationモデルを用いて旬流量へ分解する。なお，年流量を発生させるマルコフおよびARMAモデルを以後，マルコフおよびARMAジェネレータと呼ぶ。

今回の検討では，マルコフおよびARMAジェネレータを用いて80年間の年流量時系列を500組発生させた。発生させた年流量時系列の統計値を表-2に示す。実測流量は36年間，模擬発生流量は80年間の資料であるため，サンプル数によるバイアスが存在し，単純な比較はできないが，統計量，自己相関係数 ρ_1 ，ハースト数などは実

測値を再現していると考えられる。

6. 模擬発生流量によるダム運用シミュレーション

前節で作成した模擬発生流量データを用いて，ダム運用シミュレーションを行った。水需要タイプとして都市用水型と農業用水型の2タイプ，節水ルールとして節水なし，段階節水ルール， $s=0, 2, 4$ のDDCルール・カーブの5タイプの計算を行った。その結果を表-3に示す。

(1) ハースト数がダム運用ルールに及ぼす影響^{3),4)}

マルコフジェネレータとARMAジェネレータの差異の節水運用効果に与える影響は，顕著には認められない。これは，ダムの貯水池回転率が大きいので，融雪出水によって毎年必ず満水位まで回復し，洪水の長期的な影響を受けないためと考えられる。

(2) 節水ルールの違いが節水運用に与える影響

① いずれの水需要タイプにおいても，節水効率が高いのはDDCルール・カーブ，段階節水ルール，節水なしの順である。

② DDC ルール・カーブについては、いずれのケースでも季節早遅の考慮期間 s をゼロとした場合が最も効率的で、 $s = 4$ とした場合の効率が悪い。これは、豊平川流域における流量の変動係数が比較的小さいことに起因していると考えられる。さらに、DDC の場合、流入量の推定値に移動平均流量を使用しているが、この移動平均をとるという操作自体に「季節早遅の考慮」といったファクターが含まれていると考えられる。

(3) 水需要パターンの違いが節水運用に与える影響

いずれのケースにおいても、都市用水型の節水運用効率は、農業用水型の運用効率よりも高い。

7. おわりに

本報告では、DDC ルール・カーブの改良案の検討を行った。次に効果判定に用いる流量データを模擬発生させ、ハースト現象の長期的持続特性の影響についての検討を行った。その結果、

① 解析対象流域である豊平川のような融雪出水によって毎年貯水池が満水になるダムにおいては、ハースト現象は無視できる。

② 利水容量をファクターに加えた解の診断を行えば、無効な節水が防止される。

③ 季節早遅の考慮期間は無視できる。

との結論が得られた。

以上の検討に基づき、DDC ルール・カーブは積雪寒冷地における節水運用ルールとして実用に耐えうることが明らかになった。

残された問題は、合理的な節水ルールの最適化基準、すなわち渇水被害原単位をどう設定するかにある。

参考文献

- 1) 七澤 馨, 渡辺和好, 星 清 ; 地域特性を考慮したダム運用ルールに関する一考察, 土木試験所月報, No.411, 1987.
- 2) 竹内邦良, 富田 茂, 伊藤幸義 ; 給水用貯水池のための DDC ルール・カーブ, 第 28 回土木学会水理講演会論文集, 1984.
- 3) 竹内邦良, 吉川正剛 ; 渇水・豊水持続曲線と Hurst 数の関係について, 第 31 回土木学会水理講演会論文集, 1987.
- 4) 竹内邦良, 吉川正剛 ; Hurst 効果の渇水・豊水持続曲線への影響について, 第 42 回土木学会年次学術講演会, 1987.
- 5) 藤田陸博, 神田 徹 ; 水文学, 新体系土木工学 26, 技報堂出版, 1982.

*

*

*