

降雨予測の精度と予備放流方式の効果について
Prediction Accuracy of Precipitation And
Practicability of Anticipatory Release Operation Policy

山梨大学工学部 竹内邦良 Kuniyoshi TAKEUCHI

Anticipatory release operation against floods for multi-purpose reservoirs was proposed as a vehicle to incorporate the recent remarkable progress of precipitation forecasting techniques into better utilization of available reservoir storage.

The accuracy of precipitation forecasts was expressed by a set of standard deviations of absolute or relative prediction errors, σ_s , σ_e , σ_1 and σ_1^* that are respectively for the time that precipitation starts, the time that ends, differences between successive precipitation forecasts and differences of realized precipitation from the immediately preceeding prediction.

Numerical simulation was conducted for a hypothetical two-reservoir system of a typical scale, which revealed that the anticipatory release operation brings about an extra efficiency and reliability to the reservoir system by reducing flood damages of which the magnitude depends on the accuracy of precipitation forecasts. This is equivalent to the increase of an extra storage to the system.

Key Words: precipitation forecast, flood control, reservoir operation, anticipatory release

1. はじめに

近年発達著しい降雨予測技術を、貯水池の高度利用に生かすために、従来は特別の場合の例外措置としてのみ認められていた貯水池の予備放流方式を、通常の洪水調節操作に導入することを考える。これにより治水安全度が高まり、その結果夏期制限水位を現状より高水位に改めることができるため、利水安全度も向上する。本方式の成否は一にかかって降雨予測の精度にある。本研究は、降雨予測の精度をパラメータとして、予備放流方式の規模と治水・利水効果の関係をシミュレーションにより定量するものである。なお、本稿で扱う予備放流方式の詳細、シミュレーションモデルの構造については、竹内・林(1989)を参照されたい。

2. 予備放流方式と現行の通常ルール

予備放流方式を以下のように定義した。すなわち、治水・利水共用の貯水池において、

- 1) 洪水調節のための夏期制限水位を現行より高くし、常時利水容量を増加させる。すなわち洪水調節容量の一部が、利水部門へ貸与される。
- 2) 洪水出水が予想される場合には、利水容量の一部ないしは全部を（貸与部分だけではなく従来利水のみにも用いられていた部分も）一時的に洪水調節容量と見なし、DPによる最適放流計算に従って必要な予備放流を行う。
- 3) 洪水出水の終了時には、予備放流前の水位または常時利水容量満杯の水位にまで回復させる。
- 4) 容量使用の権利の貸借には貸借料、実使用には使用料、使用にもとづく失敗にはペナルティを課す。

一方現行の通常ルールとしては、一定率一定量のルールカーブ方式を選んだ。ここに通常ルールというのは、現行でも河川管理者の判断で洪水調節のための予備放流を行う場合があるからである。

3. 降雨予測の精度の表わし方

降雨予測の精度の表わし方としては次の二つが考えられる。一つは予測値と実現値の差の程度で表わす方

法。これは lead time が長くなると予測精度が低下するなど、直感的にわかりやすい関係を表現できる点が高いが、予測時間毎の予測値の更新のメカニズムは構成しにくい。もう一つは予測値が次の更新時点ですぐだけ変更されるか、その度合で表わす方法。これは新しい予測値が前時点の予測値に対してどれ程変化するかに注目するものであるから、予測値更新のメカニズムを表現しやすい。但し lead time と精度の関係は顕然からではなく、総合的表現力には欠ける。

ここでは降雨予測のシミュレータが必要であるから第二の方式を選び、以下のモデルを設定する。このモデルは降雨開始時点の予測、終了時点の予測、その間の各時点での降雨量の予測という三つの部分よりなる。まず τ 時点の降雨に対する t 時点での予測値 ($t=\tau$ のときは実現値) を $R_{\tau,t}$ で表わす。また t 時点における降雨開始までの時間の予測値を $T_{s,t}$ 、同じく t 時点より降雨終了までの時間の予測値を $T_{e,t}$ とする。 T_s, T_e とともに整数であり、 $T_{s,t}=t$ なら t 時点で降雨開始、 $T_{e,t}=t'$ なら t' 時点で降雨終了ということになる。また t 時点での降雨継続時間の予測値は $T_{e,t}-T_{s,t}+1$ である。

予測の精度は、各予測項目毎に予測更新時・実測時に、その直前の予測値と比べてどれだけ変化するかを、その誤差ないしは相対誤差の標準偏差をもって表わすものとする。すなわち、降雨開始および終了時点の予測については、予測誤差 ($T_{s,t}-T_{s,t-1}$) および ($T_{e,t}-T_{e,t-1}$) の標準偏差を σ_s, σ_e 、降雨予測については前予測値に対する相対誤差 ($R_{\tau,t}-R_{\tau,t-1}$)/ $R_{\tau,t-1}$ の標準偏差を、予測の更新にたいして σ_1 、実測との誤差にたいして σ_1^* とすれば、 $\sigma_s, \sigma_e, \sigma_1, \sigma_1^*$ をもって降雨予測の精度を表わすパラメータとすることができる。

以上の方針にもとづき降雨シミュレータを以下のように設計した。

$$\text{降雨開始時点の更新モデル} \quad T_{s,t} = T_{s,t-1} + [\sigma_s \varepsilon] \quad (1)$$

$$\text{降雨終了時点の更新モデル} \quad T_{e,t} = T_{e,t-1} + [\sigma_e \varepsilon] \quad (2)$$

$$\text{降雨予測の更新モデル} (t < \tau \text{ のとき}) \quad R_{\tau,t} = \begin{cases} R_{\tau,t-1}(1+\sigma_1 \varepsilon) & R_{\tau,t-1} > 0 \\ R_o(1+\sigma_o \varepsilon) & R_{\tau,t-1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{実測降雨モデル} (t=\tau \text{ のとき}) \quad R_{\tau,t} = \begin{cases} R_{\tau,t-1}(1+\sigma_1^* \varepsilon) & R_{\tau,t-1} > 0 \\ R_o(1+\sigma_o \varepsilon) & R_{\tau,t-1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここに ε は $N(0,1)$ の標準正規乱数、 $[x]$ は x を四捨五入した整数で、負となる場合は 0 をとるものとする。 $T_{s,o}, T_{e,o}$ はあらかじめ想定した降雨期間。 $R_{\tau,o}$ はあらかじめ設定される降雨強度で、

$$R_{\tau,o} = \begin{cases} R_o(1+\sigma_o \varepsilon) & T_{s,o} < \tau < T_{e,o} \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (5)$$

R_o, σ_o は降雨初期化のための、想定降雨強度ならびに標準偏差である。

なお、このモデルは予測更新段階で更新毎に降雨量の分散が大きくなる構造をもっているが、ここでは大型降雨では後半にピークが来るものが多く出るシミュレータとして採用した。

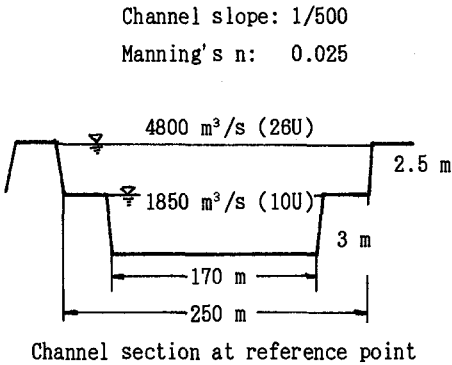
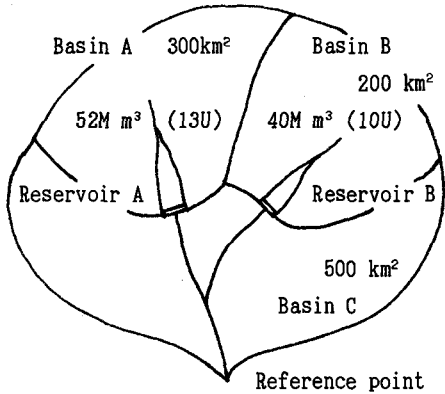
4. シミュレーションの条件

予備放流方式と現行の通常ルールによる貯水池操作のシミュレータを作成した。シミュレータは以下の4つのモジュールより構成されている。

1. 地域特性モジュール：並列 2 貯水池システムであれば、いかなる流域形状・経済特性でも対応できる。
2. 水文モジュール：降雨の Nowcast、Forecast、タンクモデルによる流出予測を行なう。
3. 最適操作モジュール：予備放流方式では、現時点での実測と将来予測にもとづく DP 計算を行なって、最適放流量を算定し、現時点での放流を実行する。次時点では実測および予測が更新され、それにもとづく DP 計算がなされ、次時点での放流が実行される。
4. 予測評価モジュール：予備放流方式と現行の通常ルールの比較を、降雨予測の精度をパラメータとして図表化する。

シミュレーションの条件としては、予備放流方式と現行の通常ルールとの差が、公平な形で評価できる一般性のあるものが望ましい。しかしながら特定の諸元を選ばなくてはならないので、わが国の多目的ダムをもつ流域ならどこにでもみられるような貯水池システムを仮想し、以下のように設定した。

4-1 流域河道貯水池諸元



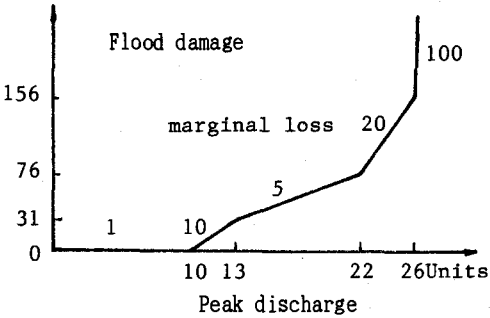
4-2 水文特性諸元

単位時間	6 時間
単位水量	400 万 m³
ダム・基準点間の流下時間	無視
降雨	全流域均一
降雨-流出モデル	二段タンク
想定降雨強度	R ₀ =70 mm/単位時間 (100mm で流出率 f=0.7 に相当)
想定降雨継続時間	T _{0,t} -T _{0,t+1} =3 単位時間

	Tank model parameters		
	Basin A	B	C
25 mm	0.25	0.3	0.2
15 mm	0.25	0.3	0.2
15 mm	0.08	0.1	0.06
15 mm	0.08	0.1	0.06

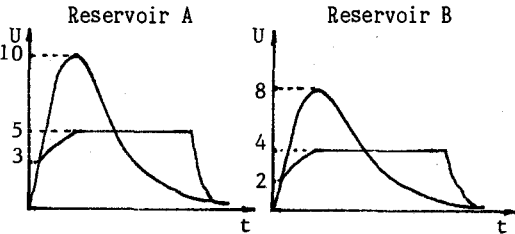
4-3 洪水被害、使用料、ペナルティ等

ここでは予備放流方式と現行の通常ルールによる洪水被害の大きさに焦点を当てているので、洪水被害関数のみを示す。その他は結果への影響がほとんどないよう適当に与えた。ペナルティ（利水損失として表現）については、予備放流後回復不可能になる水量の 2 乗に比例し、2 単位の不足で 1 単位の堤防溢水に相当する損失があるものとした。



4-4 現行の通常ルール

一定率一定量カット方式を採用し、そのカット量は計画（100年）洪水でもピーク時に基準点で堤防溢水のおこらない量、一定率は 0.7 を選んだ。また一定率カット開始の流量としては、計画洪水波型の場合に、下流洪水基準点で低水路放流で間に合う間はカットせず、一っぱいになる流量からはじめるものとして設定した。この結果右図のようなルールカーブがえられた。



以上の方針により構成されたシミュレーション用モデル流域は、以下のようなものである。洪水基準点での集水面積 1000km²、河幅 250m、最大洪水流下能力 4800m³/s、河床勾配 1/500、Manning の粗度係数 0.025 というのは釜無川、笛吹川クラスの川から想定されるものである。またその上流に 2 つの貯水池 A、B が、流域面積 300km² に 5200万m³、200km² に 4000万m³ というのも多目的ダムの規模としては普通のものである。

単位時間間隔 6 時間、単位水量 400 万m³ (400 万m³/6 時間=185m³/s) は、1000km² の流域では非常に大きい、後に最適放流時系列の計算を DP で行うため、離散化レベルを抑える必要からやむを得ない。但し洪水到達時間は半日以上であろうからそれでも一般性を失うものではない。ダム放流水の基準点までの流下時間無視は、この離散化レベルからは当然である。

降雨-流出モデルとしてはタンクモデルを用い、洪水のみを対象としているので 2 段としている。タンクの係数は洪水解析用の菅原の経験則、一段目のタンクの次定数は $T(\text{hour})=0.15\sqrt{A(\text{km}^2)}$ 、二段目はその 1/5 を、6 時間単位用に微修正したものである。

現行の通常ルールを適用する際の初期貯水量は夏期制限水位とした。夏期制限水位は、100 年洪水に対して現行ルールで調節し得る容量、すなわち 100 年洪水のピーク時の流出が基準点での計画洪水流量 4800m³/s におさえられるよう、一定率一定量ルールのカットしたときに必要な貯水容量を用いた。1 万個の降雨の中から選ばれた 100 年降雨は総降雨量 500mm で、ピーク流量は 6100m³/s、カット量は A、B 両ダムそれぞれ 2400万m³ (6単位)、2000万m³ (5単位) となった。これを両貯水池の初期洪水調節容量 C と貯水池容量 V の組合せで表わせば $(C_A/V_A, C_B/V_B)=(7/13, 5/10)$ ということである。

一方予備放流方式での初期洪水調節容量の組合せは、 $(C_A/V_A, C_B/V_B)=(7/13, 5/10)$, $(3/13, 2/10)$, $(0/13, 0/10)$ と変化させた。これは、予備放流方式では洪水調節容量を小さくとっても、これを大きくとった現行の通常ルールと同等、ないしはそれ以上の洪水調節効果を期待することができるかどうかを検討するためである。これが然りとすれば、予備放流方式の導入は有効貯水量の増加に相当する効果をうむことになる。

降雨の開始および終了時点の初期想定は $T_{s0}=3$, $T_{se}=5$ および 降雨継続時間は同じで $T_{s0}=2$, 1 とする三つのケースを考え、予測誤差の標準偏差はつねに $\sigma_s=0.2$, $\sigma_e=0.2$ (いずれも 1.2 時間に相当) とした。降雨予測の相対誤差の標準偏差は σ_1 , $\sigma_{1*}=0.2, 0.4, 0.6$ と変化させた。

一つの降雨シミュレーション条件にたいし、100 個の予測・実測系列を発生させた。なお、この降雨シレータが時として極端に大きな降雨を発生させる構造を持っていることから、総降雨量 600mm 以上のものは不採用とした。

5. シミュレーション結果

Fig. 1 は予備放流方式、現行の通常ルールとも、同一の洪水調節容量からスタートした場合の結果である。a-c は降雨予測精度を σ_1, σ_{1*} (以下 σ と略) = 0.2, 0.4, 0.6 と悪くしていった場合の様子を示している。45° の線より右にあれば、予備放流方式が優っており、上にあれば劣っていることを意味する。全体の傾向としては、予備放流方式が優る場合が大勢を占めていることが一目瞭然である。ただし $\sigma=0.6$ になると、予備放流方式の失敗例、すなわち洪水後の回復が行われず、利水損失 (ペナルティ) を課せられる回数が多くなっており、利水への悪影響をできるだけ回避するという方針に立つとすれば、予備放流方式導入のための予測精度はおおむね $\sigma=0.4$ 位が境目ということになる。なお Fig. 1a の $\sigma=0.2$ の場合でも、一点だけ極めて悪い場合が生じているが、これは 1-4 時点の間ずっと、5 時点目に 250mm 以上の雨があると予測しておきながら、5 時点目になってみると一滴の雨もないまま止んでしまったという、極めて特異な例である。

次に Fig. 2a, b は予備放流方式では利水容量を増し、洪水調節容量を減らしてスタートさせ、現行ルール

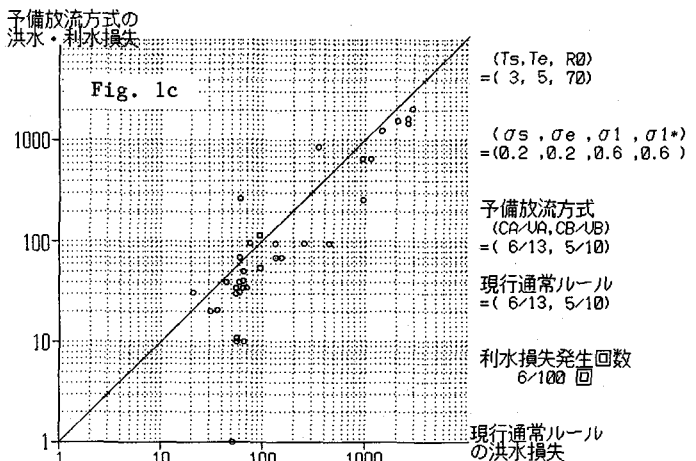
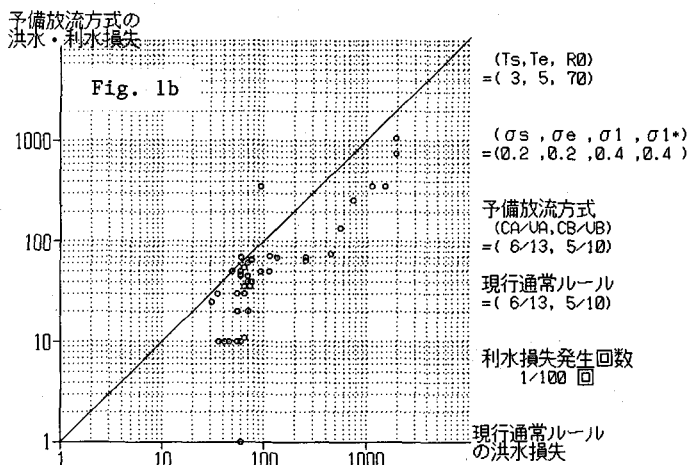
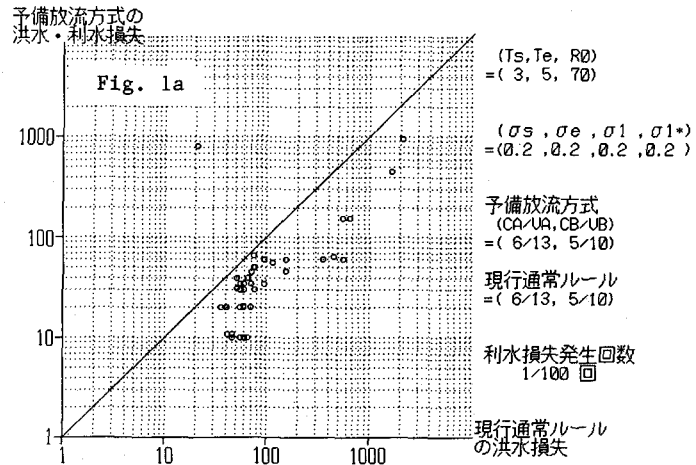
では元どおりの容量とした場合と比較したものである。 σ はそれぞれ 0.2, 0.4 である。Fig. 2aは 1a に比べ点が多少左に移動して見えるが、先の一点をのぞきすべての場合で依然予備放流方式が優っている。

Fig. 2b の $\sigma=0.4$ では、1b より劣る場合が何回か発生しているが、これは予備放流方式では現行ルールより利水水準を高くしているため、洪水後そこまで回復する必要がある、回復できないときのペナルティが大きく出ることによる。したがって利水水準を高くした分に対するペナルティは小さいということにすればこの差はずっと小さくなる。

最後に降雨予測の lead time を短くした場合についても検討した。この結果 lead time が予備放流方式に与える悪影響はほとんど認められなかった。わずかの差の生じる場合についても、被害の増大ではなく軽減になっているものもあり、予測時間短縮が必ずしも悪い結果を生じるものではないことがわかる。これは予測精度が 100%でない限り、あまり早い時点からそれを信用した予備放流を行うことは危険だということを意味している。

6. まとめ

1. 降雨予測と確定的 DP を用いた予備放流方式は、現行の通常ルールの代替方式となる高い可能性をもっている。
2. その導入を左右する降雨予測の精度として、相対誤差の標準偏差が 0.4 程度以下という第一 screening 値が得られた。
3. 予備放流方式の導入に伴い、洪水調節容量の利水容量への転換が十分可能である。
4. 予測精度が十分高いものである限り、lead time が長いことは必ずしも洪水被害を軽減する主要因とはならない。逆に精度が悪い場合は、早い時点から発表された予測ににもとずいて予備放流を開始することは



危険である。このための対応策としては予備放流の程度に上限を設けること、予測精度や lead time を確率 DP により放流量決定過程に組み込むこと、などが考えられる。

謝辞

本研究の遂行に当たっては、文部省科学研究費補助金（平成元年度重点領域研究(1)高埤琢馬代表）の助成を得た。またコンピュータ計算処理および作図には、山梨大学土木環境工学科佐藤洋君の協力を得た。記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

竹内・林(1989.10)：降雨予測を利用した予備放流方式の実用化に関する検討、京大防災研年報、N0.32, B-2, pp.363-370

