

フィルター分離AR法による相模川の流出予測について
Flood Forecasting System of The Sagami River
Basing by Filter Separation AR Method

神奈川県城山ダム管理事務所	磯	彬	Akira ISO
神奈川県城山ダム管理事務所	宮崎	康生	Yasuo MIYAZAKI
神奈川県三保ダム管理事務所	大谷	真	Makoto OOTANI
神奈川県企業庁管理局利水課	藤沢	登	Noboru FUZISAWA

I. 序 論

相模川はその源を富士山東麓の湧水池に発し、県の中央を流下し相模湾に注いでいる本県最大の河川で、城山ダムの上流域面積は1,201.3 km²に及び河口湖、山中湖とは人口的に結ばれています。特に、多目的ダムとして築造された城山ダムにおいては、各種取水の確保、水力発電の効率的運用及び洪水調節という本質的に相入れられない要求を含んだ使命を帯びています。そのため河川流量の確度の高い予測を行うことは必要不可欠のものであるが、流域の上流には調整池を有した東京電力の発電所群があり、電力需要に応じたピーク負荷運転をしているため十分な精度で予測することは難かしいが、我々はここにフィルター分離AR法による洪水予測システムを完成し、実運用配備化のため検討を重ねている所です。

II. 研究内容

1. 相模川におけるフィルター分離AR法応用システム

流出予測は、降雨量あるいは流入量という流出機構への入力、自然現象として与えられかつその入力に変換され出力となる過程には、観測不可能な種々の変数を含む非常に高い次元の広がりをもつ複雑なプロセスである。さらに、同じ雨が降っても雨ごとに流出の状況が違うというように、その特性が時間的に変化するため、出水時期とその流量を必要な精度で予測するためには、数多くのシュミレーションにより最適パラメータを求めることが重要となる。

(1) 最適AR係数自動化決定システム

AR係数は、流出分離した流出成分ハイドログラフの洪水ピークを含んだ部分区間の流量時系列からAR係数を求める。また、AR係数の次数の決定には、AR式で表現される時系列の予測誤差 ϵ_i の二乗平均の期待値(Final Prediction Error)を次式で求める。

$$(FPE)_m = (N + (m + 1) / N - (m + 1)) * S^2_m$$

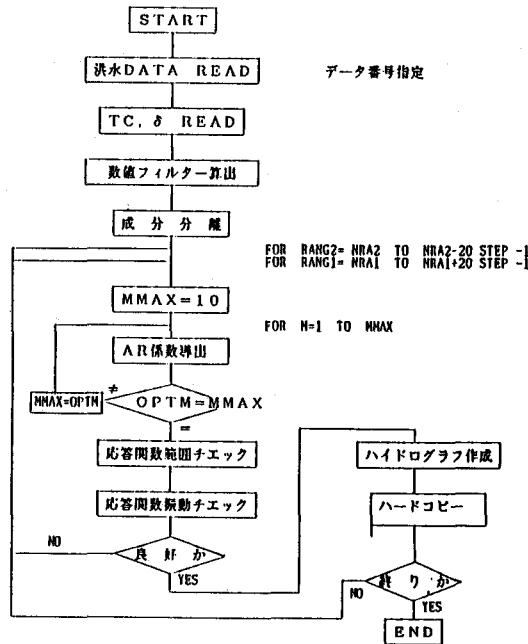
$$S^2_m = \frac{1}{N - m} \sum_{i=m+1}^N (y_i - a_1 y_{i-1} - a_2 y_{i-2} - \dots - a_m y_{i-m})^2$$

a_i : AR係数 (γ_i = 予測誤差フィルター)

N : データの総数

FPEはある項数 m で最小となる。この時の m をARモデルの次数とする。しかし、相模川水系では上記基準により求めたAR係数を応答関数に変換すると振動してしまうことが多く、最適AR係数とその次数を求めることが非常に難しい。そのため我々は、指定した条件でシュミレーションを自動的に繰り返し得られた最適AR係数を単位図に変換し、その波形の振動チェック、範囲チェックを行い検定良好のみを出力するシステムを開発した。これにより全く無人稼働で数百回程度のシュミレーションからAR係数を決定する

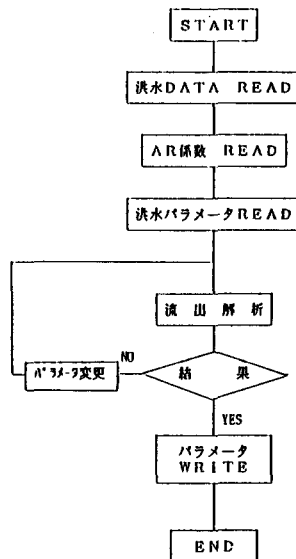
最適AR係数自動化決定ブロック図



(2) 流出解析システム

我々は、過去の洪水データを相模川水系データベースより入力することにより数多くのシュミレーションを容易に行うことを可能とし、また解析結果の最適パラメータのみをファイルに登録するシステムを開発した。また、城山ダムでは出水等により警戒体制設置が検討されると、不特定多数が洪水予測を使用することから、予測時のパラメータ設定は自動的に行えるようにすることが必要である。そのため予測に必要なパラメータの統一について解析した結果、下図により洪水ごとに設定するパラメータと一度設定すれば全洪水に適用できるパラメータに分けることができた。更に洪水ごとに設定するパラメータについても自動選択システムを検討している。

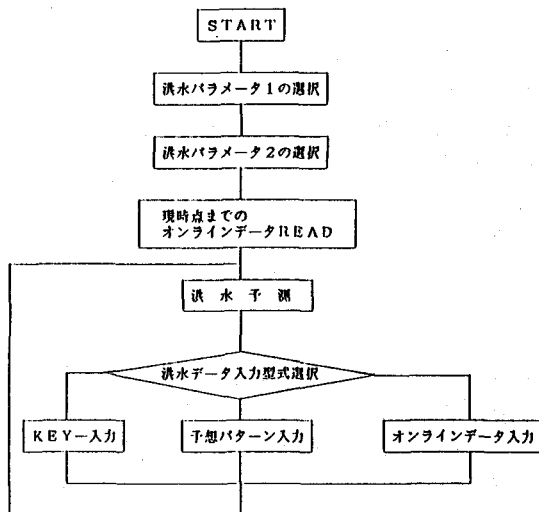
流出解析ブロック図



(3) オンライン洪水予測

既設計算機と結合し予測に必要なデータを受信し、流域に固定できるパラメータと土壌湿潤度、洪水規模等に応じて変化するパラメータを選択して、現在雨量より想定パターンで推移する予想降雨を入力して、6時間先の流出量を予測する長時間予測及びデータ収集時間ごとに、2step先を予測する短時間予測システムを開発した。

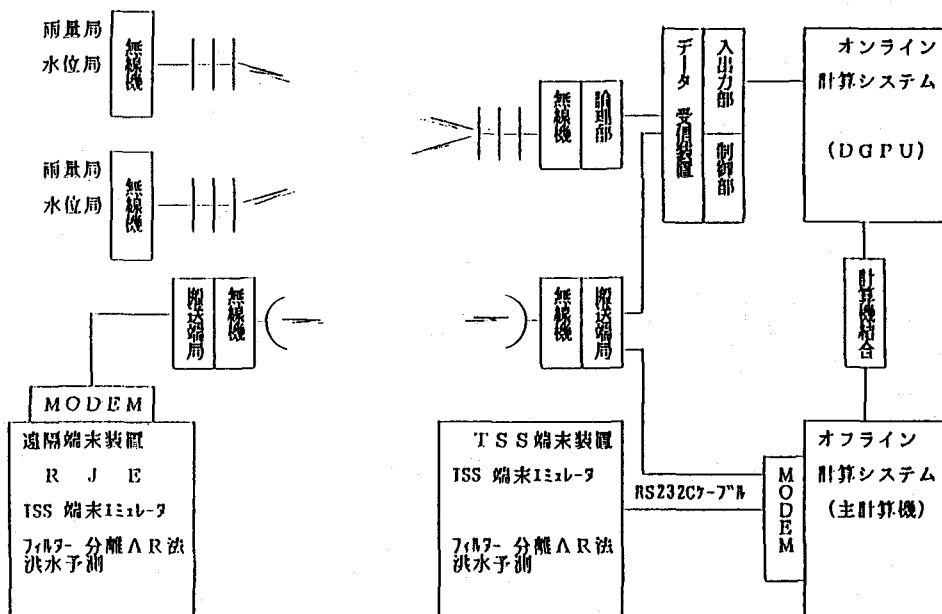
オンライン洪水予測ブロック図



フィルター分離AR法洪水予測システム構成図

ロボット雨量、水位テレメータ局

相模川水系計算制御システム



2. 洪水予測の比較について

相模川水系の洪水データに対して、現行モデルである状態方程式型指数平滑モデルとフィルタ分離ARモデルの二つの流出予測法を適用して、洪水シミュレーションを行い予測精度の比較検討を行った。

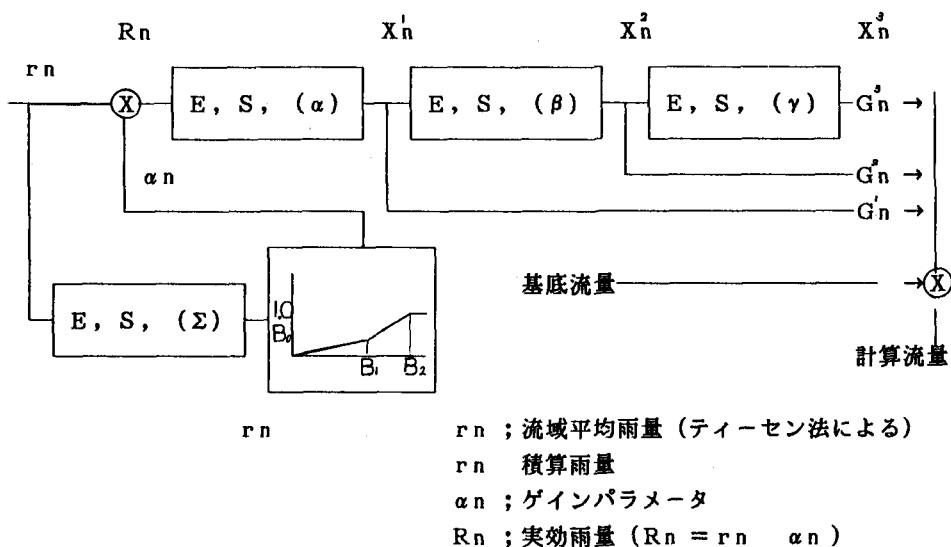
(1) 解析対象データ

対象年	昭和60年6月28日	台風 6号
流量	相模城山全流入量	最大 2210.35 m ³ /s
雨量	流域に設置したテレメータ計の雨量	
予測時間	6時間先	
同定期間	可変パラメータの同定を過去6時間にさかのぼって誤差評価により行う	

(2) 城山ダム現行モデルの概要

従来より城山ダムで行っている流入量予測法は、直列貯留型法（タンクモデル法）に若干の改良を加えた状態方程式型指数平滑モデルで、モデルに内蔵されるパラメータのうち、あるものは、固定し、その他のものは、時々刻々水系の状況変化に合わせ調整する半固定半可変適応修正パラメータ予測システムである。

相模川水系では、実測された流量データには、2乗特性、非線形特性等も見られ、積算雨量にも関係のある性質を持つことが明かとなっている。
従って、モデルの入力を実効雨量に近づけるため、次のような非線形要素を導入している。



(3) フィルター分離AR法による洪水予測

① 流出率の推定

流出率は一つの洪水中の全降雨量 R に対する有効降雨量 Re (すなわち流出量 $Q = Re = R - L$ L ; 損失雨量) の比として定義される。

$$f = Re / R = Q / R = (R - L) / R = 1 - L / R$$

洪水の始まる直前の流量 (洪水初期流量) でハイドログラフを水平に切って、この線より上の洪水流量を流出量と考えて流出率を求めても実用上問題はない。

また、初期流量 Q_a 降雨強度 r_p として次式により求めてもよい。

$$f = 1 - A / r_p \cdot \exp(-BQ_a)$$

② 降雨の非線型分離則

実測有効降雨 $X = X + X = fX$ を降雨の非線型分離則により地下水流出に寄与する降雨 X_i 、中間表面流出に寄与する降雨 X_i に分離する。すなわち実測降雨の積算流量から初期損失分を推定しこれを差し引いた降雨がまず地下水流出成分降雨 X となる X_i が最終地下水浸透能に達してからは次式により中間表面成分降雨 X_i 求める。

$$\text{流域貯留量} \quad S(i) = \sum (X_i - Y_i)$$

$$\text{部分流出寄与率} \quad Af(i) = 1.0 - \exp(-S(i)/S_{\max})$$

$$\text{中間表面成分降雨} \quad X_i = Af(i) * (X_i - X_i^{(j)})$$

③ 各流出系への入力変換

各成分降雨時系列 X_i に遅延、伸長等の操作をし各成分流出系への入力に変換する。地下水流出系の降雨は伸長効果を考慮して継続時間を m 倍に伸長し、各時間単位の降雨強度を $1/m$ にする。

$$\begin{aligned} \text{地下水流出成分} \quad \hat{X}_i^{(1)} &\rightarrow \tilde{X}_{i+i_1}^{(1)} + \tilde{X}_{i+i_1+2}^{(1)} + \tilde{X}_{i+i_1+m}^{(1)} \\ \text{中間表面流出成分} \quad \hat{X}_i^{(2)} &\rightarrow \tilde{X}_{i+i}^{(2)} \end{aligned}$$

④ 流量予測値

これらを入力として、AR係数又は応答関数から各流出成分の流出量を次式により求める

$$Y_i = a_1 Y_{i-1} + a_2 Y_{i-2} + a_3 Y_{i-3} + \dots + a_p Y_{i-p} + \lambda X_i$$

$$Y_i = h_0 X_i + h_1 X_{i-1} + h_2 X_{i-2} + \dots + h_m X_{i-m}$$

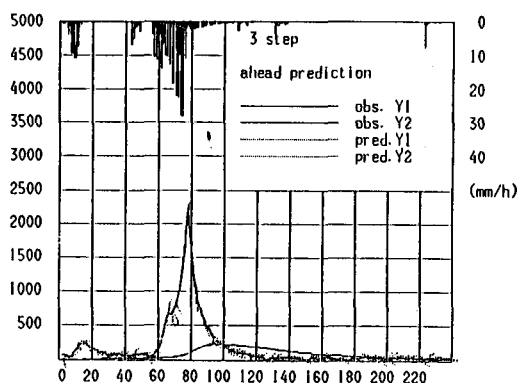
$$\text{求める流量予測値} = \text{全流出量の和} \quad \therefore Y_i = \sum_{j=1}^L Y_i^{(j)}$$

結 果

両モデルを使用した洪水予測結果を下図に示した。これによると現行モデルでは、洪水規模が小さいと基底流量の影響により初めの予測誤差が大きくなる。解析例では流出量の立上がり部分及びピーク値近傍で大きく誤差が出ている（標準誤差 1 時間予測で 33.25）これは現行モデルでは、全洪水中基底流は一定と考えているため、洪水初期流量が小さいときは可変パラメータが追従できなかったためと思われる。フィルター分離 AR 法においては、短時間予測は比較的良い結果が得られている。特にピークを過ぎた立下がり部分では良く一致している。

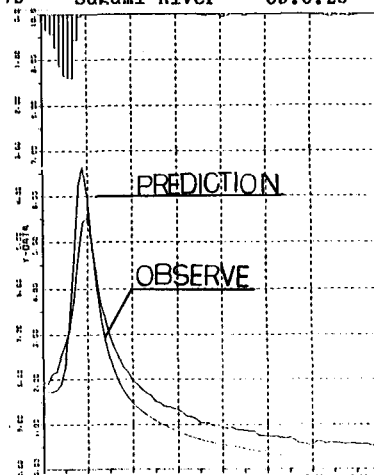
両モデルのハイドログラフ及び実測値と計算値とのピーク流量とその誤差の比較を行った。その結果、予測条件が若干異なるが本解析例ではフィルター分離 AR 法の方が精度が良いことが判った

m³/s Sagami-River ' 85.6.28



フィルター分離 AR 法

m³/s Sagami-River ' 85.6.28



状態方程式型指数平滑モデル

Ⅲ. 主要な結論

フィルター分離 AR 法の理論的及び物理的内容を検討して洪水規模の異なるデータに対して流出解析を行い、相模川水系への予測システムの適用性について検討した結果次の事が判った

① AR 係数、応答関数について

地下水流出量成分については、全洪水に対して AR 係数を固定できる。中間表面流出量成分については、洪水初期流量により AR 係数を選択すれば、3 種類程度で可能である。

② 予測パラメータについて

最終浸透能 XG は、土壌の湿潤度を表わす洪水直前の初期流量と相関があり、しかも流域貯留量とも相関がある。また雨量伸張率、流出遅れ時間、有効雨量の最小値、初期損失雨量は、降雨強度及び降雨継続時間と相関があるが、数種類のパラメータファイルで予測が可能である

③ 予測システムについて

フィルター分離 AR 法では、洪水ごとに設定するパラメータが多いが最適パラメータを設定すればかなり精度がよいことがわかった。今後は前図に示したシステム構成で実運用して行くことを検討した。更に今後の課題として、降雨強度、降雨継続時間及びその他の条件を検出して、土壌の湿潤度等を量的に算出し、パラメータを自動選択する方法を研究したい。