

知識ベースを用いたファジィ貯水池操作に関する研究
Knowledge-based Reservoir Operation Based on Fuzzy Inference Theory

岐阜大学工学部 小尻利治

岐阜大学大学院 藤井忠直

The real-time operation of reservoir is carried out based on available information on the inflow hydrographs, the status of reservoir-storage volume and the outflow release rates. The proposed operating procedure is conceived as a system comprising of three fuzzy scopes, namely, inflow hydrograph, storage volume and inflow discharge. The knowledge data base on the inflow hydrograph is extracted from the past flood records using recognition techniques. According to the combination of sub-spaces, the release in rule base is optimized through dynamic programming and the real release is decided through fuzzy inference theory.

keywords:reservoir operation, knowledge base, fuzzy inference, pattern recognition

1. 序論

洪水防御や水資源管理に際して、ダム貯水池が有力な手段であることは明らかである。しかし、実時間という観点からすると、最適操作を達成するにはハイドログラフの形状が重要な要素となり、操作目的に対して満足する結果が得られていないのが現状である。小尻らは、洪水予測と放流量の最適化を組み合わせたシステムを提案し、流出過程の逐次推定と操作の結合をはかった(Kojiri, 1986)。ところが、実流域においては、流出、貯留、河川流下過程の不確実性に加えて、観測データ・計算項目の多さのため、管理所レベルの計算機では処理できない場合があり、管理者の経験に依存する場合が多い。そこで、本研究では、ファジィ理論(Kaufmann, 1975)を導入して、実時間での洪水用貯水池操作手順を確立しようとするものである。操作ファジィ空間には、計算手順の簡便さと最適解への接近を考えて、流入ハイドログラフ、貯留量、流入観測量を用いる。流入ハイドログラフのデータベース化に関しては、パターン認識手法を用いて代表流況の抽出をはかる。いわゆる、知識ベース型の操作ルールを作成するものである。

2. 知識ベース型貯水池操作手順

通常のエキスパートシステムとの類似性を考えると、貯水池の実時間操作は、(i)過去の水文データ、管理記録、管理者の経験を扱うデータベース、(ii)得られた情報を処理し、操作に必要な形態にして保存する知識ベース、(iii)実時間でのダム管理情報として放流量を計算する推論機構、(iv)管理者への具体的な放流量の提示と説明を行なうインターフェイス、より構成されよう。一方、過去の貯水池操作で得られる情報は、雨域の移動、流入系列、放流系列、下流評価地点の流量、貯水池容量、河道疎通能などがあり、毎時点の観測情報からは、流入量、貯留量、雨域の移動方向・強度など、がある。それらを整理すると、各部分システムは次のようになる。

まず、データベースにおいては過去のあらゆる記録が取り扱われ、計算機内に数値あるいは必要な形で保存される。これには膨大な記憶容量が要ることは言うまでもない。知識ベースでは、代表的な降雨分布または流量分布に対して最適政策を求め、ルールベースにおいて利用可能な形式に変換される。各制御時点においては現在の降雨強度、流量、貯水量が観測されているので、推論機構で仮放流量が計算される。最後に、下流地点までの流下過程、人工洪水の発生の有無を確認し、インターフェイスより管理者に表示される。こうした手順は、洪水が終了するまで続けられ、図-1のようなフローチャートで示される。

3. 部分システムのモデル化

3.1 知識ベース

貯水池操作に必要なデータが揃えられ、知識ベースの作成になる。入手可能なデータや計算量をもとに、操作空間を貯水量、流入量、流入ハイドログラフの3成分より構成されると見なす。実時間操作では放流量決定までに短時間を要求され、しかも、観測データと予測値の不確実性を無視できないので、ここでは、ファジ理論の導入をはかる。具体的には、ハイドログラフ空間FHを極大洪水(extremely big flood)、大洪水(big flood)、計画洪水(media flood)、通常洪水(small flood)の4個程度に分割する。貯水量空間FSは治水容量に対して、空状態(almost empty space)、かなり余裕がある状態(big space)、まあまあの状態(media space)、あまり無い状態(small space)に分割される。流入量空間FDは計画高水流量の100%、75%、50%、25%、5%と極大流量の6個に分類する(表-1参照)。

分類するハイドログラフは、全てのデータよりパターン認識概念を用いて分けられる。分類に際しての目的関数は、ハイドログラフの形状に基づいて分ける必要があり(Kojiri, 1989)、次式を適用した。

$$OFp = \max_t (|QI(t,n) - FQ(t,i)| / FQ(t,i)) \quad \rightarrow \quad \max \quad (1)$$

ここに、 $FQ(t,i)$ は分類された代表番号*i*のハイドログラフにおける時刻*t*での流量であり、*i*に属するデータの平均値、また、 $QI(t,n)$ は、データ番号*n*のハイドログラフの流量である。分類にあたっては、全体的な最適解をうるため従来のK-meansに初期値を換えていくrandom K-meansを適用する。対象ハイドログラフは、代表ハイドログラフに対して時間軸上の移動を行い、目的関数を最小化してずれ時間を設定する。両ハイドログラフの重なりが少ない時は、自然低減係数でハイドログラフを外挿する。

次に、洪水制御の目的は洪水による氾濫の危険性を減少することと定義すると、次式のように表わせる。

$$OFc = \max_t (QO(t)) \quad \rightarrow \quad \min \quad (2)$$

従って、Dynamic Programmingの関数漸化式は、

$$f(S(t)) = \min (\max(QO(t), f(S(t-1))) \quad (3)$$

となる。ハイドログラフ、貯水量、流入量の代表値の組み合わせに対して最適放流量を計算したものが知識ベースとなる。

3.2 ルールベース

知識ベースにおける放流量を1ステップ先の値と解釈すると、操作ルールは、IF-THEN形式に表わすことができる。すなわち、ハイドログラフHYがFH(i)、流入量QIがFD(j)、貯水量SがFS(k)のとき、放流量QOは

$$\text{IF HY is FH(i), QI is FD(j), S is FS(k), THEN QO is QR(i,j,k)} \quad (4)$$

である。このルールベースは計算機内のスプレッドシート上に書かれる。

3.3 推論機構

各制御時点における観測情報と放流量に対する不確実性を同時に考慮するため、次のような形でファジ推論を導入しよう。現在観測されているハイドログラフ、流入量、貯水量をhy、qi、sで表わす時、各要素の曖昧さは次のメンバーシップ関数で表わされる。

$$fmh(hy) = (ah_1 ph_1 - |DS(t,i) - bh_1|) / ah_1 ph_1 \quad (5)$$

$$fmq(qi) = (aq_j - |qi - bq_j|) / aq_j \quad (6)$$

$$fms(s) = (as_k - |bs_k|) / as_k \quad (7)$$

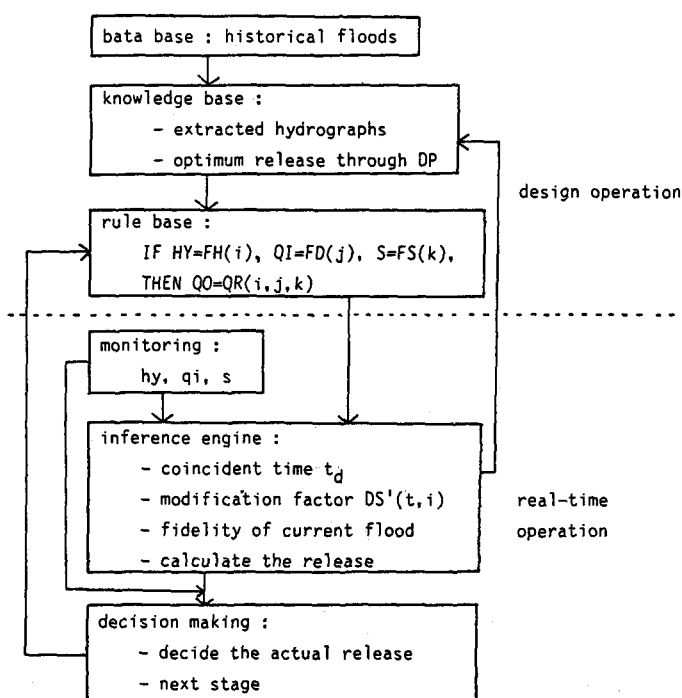


図-1 知識ベース型貯水池操作手順

表-1 ファジィ代表値の決め方

fuzzy scopes	small	more or less small	medium	more or less big	big	very big
hydrograph	ordinary storm FH(4)		design flood FH(3)		big flood FH(2)	extremely big flood FH(1)
inflow discharge	5% of critical discharge FD(6)	25% of critical discharge FD(5)	50% of critical discharge FD(4)	75% of critical discharge FD(3)	critical discharge level FD(2)	extremely big dischartge FD(1)
reservoir-storage volume	small space FS(4)		medium space FS(3)		big space FS(2)	almost empty FS(1)

$$DS(t,i) = \min_t (\max_t (q_i - FH(t,i) / FH(t,i))) \quad (8)$$

ここに、a. と b. はファジィメンバーシップ関数のパラメータ、 ph_i は分類されたハイドログラフ i の発生確率、 td は分類されたハイドログラフと現在まで流入量系列間の距離を最小にするずれ時間である。その結果、ファジィ代表値(fuzzy scopes) $i j k$ に対する観測洪水の類似度は

$$w_{ijk} = \min (f_{mh}(h_y), f_{mq}(q_i), f_{ms}(s)) \quad (9)$$

となる。これに対して、著者らは修正法としてメンバーシップ関数値を全て評価できる平均法を提案している。すなわち、

$$w_{ijk} = (f_{mh}(h_y) + f_{mq}(q_i) + f_{ms}(s)) / 3 \quad (10)$$

である。一方、放流量のメンバーシップ関数として次式を用いた。

$$f_{mr}(q_0) = (a_{r_{ijk}} - |q_0 - b_{r_{ijk}}|) / a_{r_{ijk}} \quad (11)$$

ここに、 $b_{r_{ijk}}$ は知識ベースにおける最適放流量を U 個に再配列したものである。過去に類のない特殊な洪水ハイドログラフ(極大、極小)の発生を考慮するため、放流量のファジィ代表値を次式によって適宜変更する。

$$QR(i,j,k) = (1 + DS'(t,i)) QR(i,j,k) \quad (12)$$

$$DS'(t,i) = (\text{sign}) \min_t (\max_t (|q_i - FH(t,i)| / FH(t,i))) \quad (13)$$

ここに、(sign) はファジィ代表値を外挿するために距離の正負を示したものである。従って、放流量のメンバーシップ値はファジィ最大化とファジィ最小化より

$$fr(q_0) = \bigvee (w_{ijk} \wedge f_{m_{ijk}}(q_0)) \quad (14)$$

で求められる。最後に計算上の放流量はファジィ推論よりファジィ空間の重心として

$$Q_0 = \int fr(q_0) q_0 dq_0 / \int fr(q_0) dq_0 \quad (15)$$

で与えられる。

4. 適用と考察

本実時間操作システムに実河川データを適用してその有効性を確かめよう。表-2 は貯水池に関するデータであり、25 個の洪水データと 1 個の観測データを用いた。図-2 は抽出された 4 個の代表ハイドログラフである。代表ハイドログラフとは別に、過去のデータの中で最大のピークを有するものを特異な記録として 5 番目代表値として組み入れた。式(5)のハイドログラフの頻度は、 $pr1=2.0$, $pr2=12.0$, $pr3=9.0$, $pr4=2.0$, $pr5=1.0$ である。メンバーシップ関数のパラメータは制御後のピーク流量の減少を図るために、次の目的関数を定義した。すなわち、

$$OFp = \frac{ND}{\sum_{n=1}^{ND} (|QP_n - QC_n| / QP_n)} / ND \quad (16)$$

である。ここに、 QP_n は洪水 n でのピーク流量、 QC_n は制御後のピーク流量、 ND はデータ数である。制御効果を見るために、過去のデータ全てに適用し、その期待値と比較することになる。さらに、最適なパラメータ値を獲得するために、非線形計画法という最急降下法の概念を導入する。具体的には、パラメータの

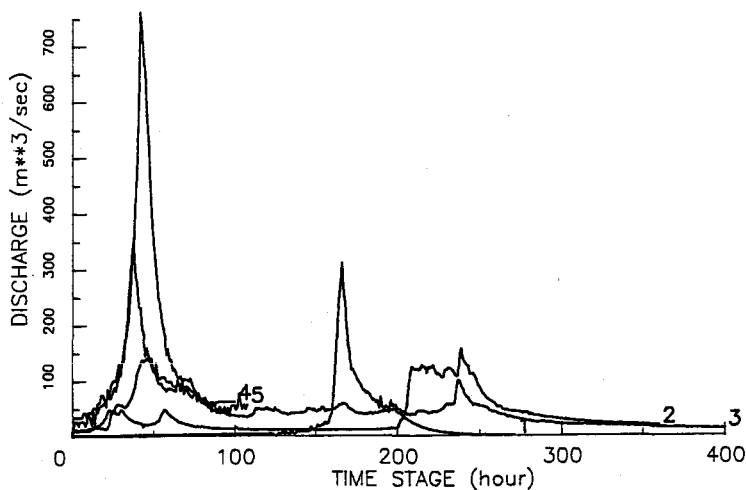


図-2 分類された代表ハイドグラフ

表-2 貯水池の諸元

total capacity of reservoir	$6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$
flood control capacity	$2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$
design flood discharge	$480 \text{ m}^3/\text{sec}$

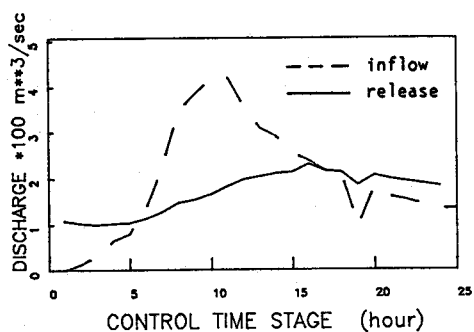


図-3 後件部の曖昧さを考慮しない操作結果

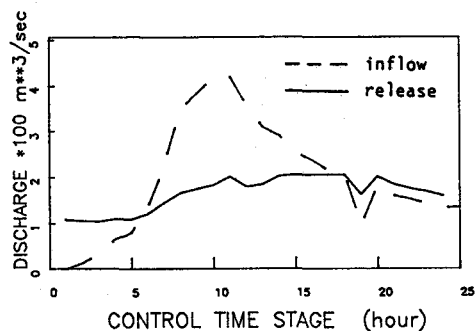


図-4 後件部に曖昧さを加えた操作結果

初期値 a_0 を任意に設定する。続いて、各パラメータを適当な幅だけ動かし ($a_1 = a_0 + \Delta a$)、目的関数値を計算する。3種類の移動方向の中で最も関数が改善されたものを1次解とし、同様にして次の改善方向を探る。この手順を繰り返し、収束したものが最適解となる。パラメータの初期値はそれぞれ $a_{h0} = 10$ 、 $a_{q0} = 480$ 、 $a_{s0} = 5 \times 10^5$ とし、変動値を $\Delta a_h = 0.1$ 、 $\Delta a_q = 10$ 、 $\Delta a_s = 1 \times 10^5$ を用いた。得られた収束値は、最小化法の場合 $a_h = 0.1$ 、 $a_q = 150$ 、 $a_s = 110 \times 10^5$ 、相加平均法の場合 $a_h = 0.1$ 、 $a_q = 150$ 、 $a_s = 30 \times 10^5$ であった。最小化法では放流量が急激に増大しピーク後には放流量と流入量がほぼ同じ値になるのに対し、相加平均法では放流量が徐々に増加しピーク後も放流量が流入量より多い傾向があった。

後件部のメンバーシップ関数のパラメータは、 $a_r = 100$ 、 $b_{r1} = 0.0$ 、 $b_{r2} = 100$ 、 $b_{r3} = 200$ 、 $\dots$ 、 $b_{r9} = 900$ とし、知識ベースで与えられた放流量をその近傍の代表値に置き換えた。図-3は、相加平均法を用い、初期値を $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ とした場合の制御結果で、後件部に曖昧性を入れていない。破線は流入量、実線は放流量である。図より、時刻7ぐらいまでは予備放流を行ない、その後貯留が進むことがわかる。また、ピーク後は、次の降雨に対処するため貯水量の減少が図られている。後件部に曖昧性を入れた場合の制御結果は、図-4である。一層の平滑化が可能であった。これは、計画高水程度の洪水に限らず大出水に対しても同程度の結果が得られていることより、本理論の有効性・適用性がわかる。

5. 結論

本研究は貯水池の実時間操作をエキスパートシステムとしてとらえモデル化したものである。ここで、得られた成果をまとめると、以下の点が挙げられよう。

- (i) 貯水池の主たる操作手順をデータベース、知識ベース、ルールベース、推論機構よりなるとし、エキスパートシステムとの対応を明らかにした。その結果、多量のデータ管理を行なう大型計算機と実管理を行なう小型計算機に操作過程を分割することができた。
- (ii) 貯水池の操作空間を流入ハイドグラフ、流入量、貯水量で構成し、パターン認識によるハイドグラフの分類、Dynamic Programmingによる代表値間での最適放流量の計算を行ない、ルールベースの作成を容易にした。
- (iii) メンバーシップ関数の決定は、過去の洪水データに対して最適制御が達成できるよう、非線形最適化問題として定式化した。
- (iv) 実時間での放流量は、ファジィ推論によって決定した。前件部の類似度は、最小化手法だけでなく平均化手法を提案した。また、後件部に曖昧性を加えて推論を行ない制御結果を比較した。

今後は、予測・予報情報の取り込みと意思決定の際の表示法を加え、実用化を高めたい。

6. 参考文献

1. Kojiri, T., Takasao, T and Ikebuchi, S. : Systems Approach to Real-time Operation of Dam Reservoir Including Water Quality and Quantity, Proc. 5th Congress APD-IAHR, 1986, pp.495-509.
2. Kaufmann, A. : Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets, Vol. 1, Academic Press, 1975.
3. Panu, U.S., Unny, T.E. and Ragade, R.K. : A Feature Prediction Model in Synthetic Hydrology Based on Concepts of Pattern Recognition, Water Resources Research, 1978, 14, No.2, pp.335-344.
4. Kojiri, T. : Systems Analysis in Multi-dam Reservoir Systems Including Water Quantity and Quality Controls, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks, A.A. Balkema Publisher, 1987, pp.25-37.
5. Kojiri, T. and Ikebuchi, S. : Real-time Operation of Dam Reservoir by Using Fuzzy Inference Theory, Proc. 6th Congress APD-IAHR, 1988, pp.437-333.