

ファジ理論を用いたダム貯水池の実時間操作

Real-time Operation System of Storage Reservoir with Fuzzy Theory

小 尻 利 治
Toshiharu KOJIRI

1. はじめに

エキスパートシステムとは、問題領域におけるエキスパートの知識を利用して、極めて複雑な問題を、エキスパートと同程度のレベルで解決するシステムである。ところで、我々は過去に記録された多数多種のデータを有しており、その中より解析目的にあったものを選択し、制御参考資料として利用している。磁気テープや記録紙にかかれたものは生データであり、直接計算機に入れることは困難である。数値の読み取りやA/D変換によりデジタル化を行ない、必要な種類・期間のデータを収集してデータファイルとして計算機内に保存している。しかる後に、プログラム上でデータファイルを呼び出し解析を進めている。こうした過程はデータベース・知識ベースの作成そのものであり、従来の貯水池操作でも、流出パラメータの作成、代表的台風とその進路の分類など知識ベース型の形態をとっていたと言える。そこで本研究では、貯水池操作過程を多量の計算処理を行なう知識ベース作成部分と迅速かつ高速な実時間処理を行なう推論部分に分け、計算過程の分割化と実時間での放流量決定を構築しようとするものである。ただし、貯水池の実時間操作条件として、(i)毎時観測されるデータが存在すること、および、(ii)効率的な運用を達成するため、最適化問題として決定された放流量系列に近い効果が達成できること、を前提としておく。

2. エキスパートシステムの概要

典型的なエキスパートシステムは、MYCINのようなコンサルテーションシステムである。こうしたエキスパートシステムをソフトウェアとして実現するには、

- a) データを管理するためのデータ・ベース機能
 - b) 知識をエキスパートから獲得して知識ベースを構築することを支援するための知識獲得支援モジュール
 - c) 専門知識を管理するための知識ベース
 - d) 知識を利用して推論を実行するための推論機構
 - e) 結論の根拠をユーザに説明するための推論過程説明モジュール
 - f) ユーザにとってシステムを使い易くするためのユーザー・インタフェース・モジュール
- などが必要といわれている¹⁾。ここで、貯水池操作に必要な要素や、観測、予測可能な要素を用いてエキスパートシステムを構成していくと次のようになる。まず、放流量の決定要素としては

- | | |
|------------------|----------|
| (i) 今後の流入ハイドログラフ | $H I(t)$ |
| (ii) 現時点での流入量 | $Q I(t)$ |
| (iii) 現貯水量 | $S(t)$ |

が重要である。これに加えて

- | | |
|---------------|------------|
| (iv) 貯水量の増加割合 | $d Q I(t)$ |
|---------------|------------|

(v) 貯水池内の波高	WS (t)
(vi) 下流洪水防御地点までの堤防状況(強度、高さ)	DC (t)
(vii) 雨域の移動方向	RD (t)
(viii) 台風の進路	CT (t)
(ix) ダム管理者の経験	HE (t)

も有効な情報として考えられる。すなわち、放流量 $QO(t)$ は次のような関数として表現できる。

$$QO(t) = f(HI(t), QI(t), S(t), dQI(t), WS(t), DC(t), RD(t), CT(t), HE(t)) \quad (1)$$

(iv)～(ix)の要素については、(i)、(ii)と関係が深いものとして(vii)(viii)があり、定式化の複雑なものとして(v)(vi)、さらに、定式化の困難なものとして(ix)があるので、基礎的な情報である(i)(ii)(iii)を対象にモデル化を進めることができよう。具体的には、各要素は以下のように対応している。

(1) データベース

推論を進める過程で入力されたデータは、事実に基づく知識として知識ベース内で管理する場合も多く、ケースデータの保存や外部データベースからの直接入力がある。過去の水文データ(ハイドログラフ、ハイドログラフ)や評価地点流量、放流記録、貯水池容量、河道疎通能、地形、地質データ、流入、流出パラメータなどのなかより、貯水池操作に必要な種類・期間のデータをそろえ、ファイル化する部分が相当する。

(2) 知識獲得支援モジュール

エキスパートシステムの生命は、問題領域のエキスパートから獲得された専門知識であり、知識の質と量によって、システムの能力が左右される。従って、知識ベース・エディタとも呼ばれる知識獲得支援モジュールは、極めて重要な役割を担っており、知識の定義、知識ベース内の知識の確認、テストケースでの知識の評価、知識の変更や追加などを含んでいる。つまり、試行錯誤を通してエキスパートとしての知識が体系化されていく。したがって、知識ベース構築の過程で以前に入力された知識と現知識体系の間に矛盾や重複が起こりうるので、知識獲得支援モジュールは、できるだけ矛盾点の発見や解決を迅速に行うことが要求される。

(3) 知識ベース・ルールベース

エキスパートから獲得された専門知識は一定の形式で表現され、それらが集まって知識ベースを構成する。ここでは、知識の表現単位をどうするか、全体としてこれらをどのように体系化するか、メタ知識(知識の表現に関する知識、あるいは推論の進め方に関する知識)が必要ならばどう表現するのか、曖昧さをどう表現するか、が知識ベースの設計における基本的な問題となる。言い替えると、貯水池操作の基礎情報となる部分であり、流出予測におけるパラメータ、代表ハイドログラフ、もしくは、代表台風進路と対応する最適放流量系列の整理が相当する。データベースの量が多い場合には、大型計算機で処理される。さらに、知識ベース内の基本的な放流ルールを実時間操作に用いるべく、具体的な操作ルールとして書き直す部分である。そのため、ダム貯水池の管理所で使用されているコンピュータレベルでの記述も必要である。

(4) 観測・推論機構

知識ベース内の知識を利用して外部から与えられたデータあるいは事実を解釈し結論を導き、ユーザへこれを提示し、求めに応じて結論などを説明するなど、推論制御を行うモジュールを推論機構と呼ぶ。推論とは、事実に基づいて最適の結論を選択するプロセスを意味し、知識が利用される。知識

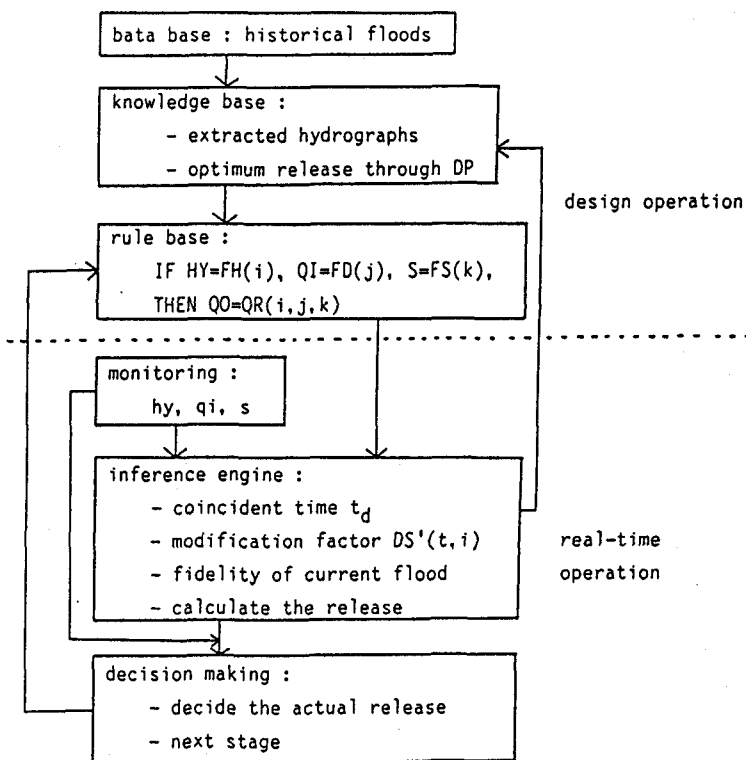


図-1 貯水池操作のフローチャート

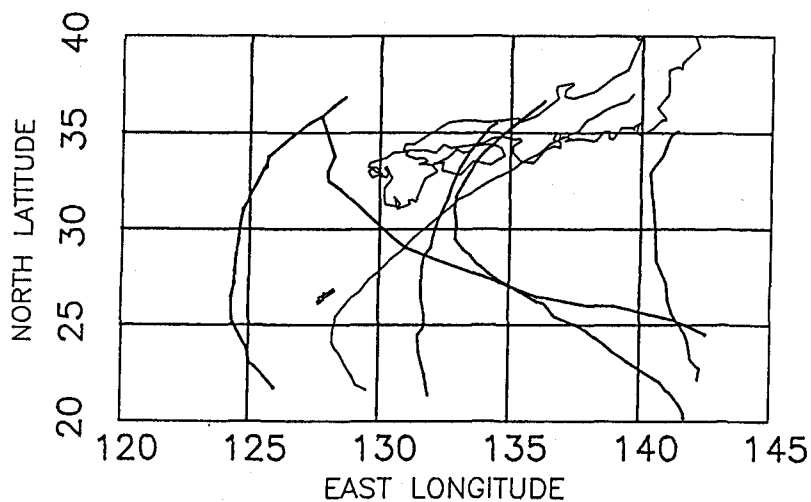


図-2 分類された台風経路

ベースと推論機構とは互いに密接な関係にあり、知識の表現モデルが決まると、それに対応する推論方法もおのずと限定されたものになる。まず、観測では、最新の水文データを収集するとともに、必要な情報を抽出して推論機構へ送る。欠測がある場合は、ここで補正を行なうか、知識ベースで補正される。続いて、推論機構では、観測データとルールベースより現時点での放流量を計算する。観測されたデータあるいは、知識ベース内で修正されたデータは新たな情報として知識ベース内に保存される。

(5) 推論過程説明・意志決定モジュール

知識型コンサルテーションシステムでは、単に結論を提示するだけでなく、なぜこの結論に至ったかを示すための説明機能が必要とされる。ユーザはシステムが出す結論、助言、説明などを参考にし、最終的には彼自身で判断を行なうわけである。洪水時の貯水池操作では、貯水池、河道、雨域、氾濫、経済状態などあらゆる効果を考慮して実放流量を決定することになる。

(6) ユーザ・インタフェース・モジュール

エキスパートシステムのユーザ（管理者）は、一般にコンピュータの非専門家と見なしてもよい。従って、システムからの出力はユーザにわかりやすく変換して表示されるとともに、操作も簡単で、意志決定への必要な情報が即時に得られなければならない。

以上の計算要素、過程をまとめると、図-1 になる。

3. 実時間貯水池操作のモデル化

3. 1 データベース

最も基本的なプロダクションルールシステムは

IF 条件 THEN 結論 / 行動 (2)

の形をしたプロダクションルールの集合からなるルールベース、事実の集合からなるデータベース、およびデータベース内の事実に対してルールを適用して推論を行なうためのインタープリタの三つから構成されている。すなわち、データベースは事実としての知識を管理し、ルールベースは判断に関する知識を管理するものである。データベースは推論に直接関係する事実および仮説を管理する機能であり、推論の結果はここに直接反映する。プロダクションシステムにおけるデータベースは、対象とする現実世界のモデルであると考えてよい。したがって、データベースの内容および構造はプロダクションシステムの性格や能力に大きく影響する。

降雨、流入量などの水文データは、種々の加工をなされているものが多いので、ここでは時間スケールに関係なくそのままコンピュータのディスクに保存したものをデータベースと呼ぶことにする。

3. 2 知識ベースの作成

貯水池の治水操作を実現するにあたっては、ハイドログラフの予測は不可欠である。正確に洪水規模を予測することは非常に困難であるが、ダム管理者も、水文観測情報だけでなく、台風の進路・強さを加味し、洪水規模を類推して放流量を決定しているのが現状である。そこで、台風性降雨による降雨規模を予測するために、(i)台風に関する気象情報と(ii)降雨量、流入量等の水文情報を利用したハイドログラフ予測を検討しよう。要素としては、

TY(t) : 当該時刻 t における台風の情報

HYE(t) : 時刻 1 ~ t までにおけるハイエトグラフ

HYD(t) : 時刻1～tまでにおけるハイドログラフ

Q1(t) : 時刻tにおける流入量

HYD(t) : 時刻1～tまでにおけるハイドログラフ

S(t) : 時刻tにおける貯水量

を用いる。故に、初めに台風情報、ハイエトグラフ、ハイドログラフにより降雨規模・洪水規模を求め、その結果と流入量、ハイドログラフ、貯水量の観測量により計算放流量を決定するという二段階推論プロセスを行なうことになる。

解析対象領域は、東経120度から145度まで、北緯20度から40度までとする。台風データは、1900年から1980年までの近畿地方に大きな被害をもたらした84個を用い、ソフトクラスタリング（ファジィ分類^{2),3)}手法によりパターンの曖昧性を保持したまま分類すると図-2のようになった。ここで、距離を”代表的な台風（クラスターセンター）のコースと新たに分類する対象台風（サンプル）との長さ（ $|X_i - Z_j|$ ）の最小値”で定義し、ソフトクラスタリングのしきい値を0.205とした結果である。ただし、 X_i はサンプル台風iの位置、 Z_j は分類されたクラスターjでの代表台風の位置である。これらの台風のパターンには、個々のクラスターセンターの差異がよくわかり、異常進路をも要素として含んでいるため、今後現れる特異入力にも貯水池操作が対応できるであろうと思われる。分類された各々のクラスターに含まれるサンプル台風は、

i) 紀伊半島を北東に進む型	57個
ii) カーブを描きながら四国、中国地方を北東に進む型	37個
iii) 四国、中国地方を北上する型	70個
iv) 東経125度線に沿って北上する型	24個
v) 中国大陆に向かう北西進型	8個
vi) 東経140度線に沿って北上する型	28個

であった。次に、各クラスター内でもハイエトグラフのソフトクラスタリングを行ない、代表ハイエトグラフを求める。なお、分類の目的とそれを達成するためのクラスターセンター（代表ハイエトグラフ）とサンプルとの距離 D_{xz} のとり方は、台風進路の場合と同様に以下のように定義する。

$$f(Z, \omega, X) = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n \omega_{ij} m D_{xy}^2 \longrightarrow \min \quad (3)$$

$$D_{xy} = \max |x(i, t) - z(j, t)| \quad (4)$$

$$1 \leq j \leq K, 1 \leq i \leq n$$

ただし、 $x(i, t)$ は、サンプル番号iの時刻tにおける降雨量、 $z(j, t)$ は、クラスターセンターjの時刻tにおける降雨量である。Kは、クラスターセンターの総数、nは、サンプルの総数、mは定数である。分類された台風パターンでの代表ハイエトグラフは、i) 紀伊半島北東進型では3パターン、ii) カーブを描きながら四国、中国地方を北東に進む型では3パターン、iii) 四国、中国地方北上型では、大規模、中規模、小規模に分かれる4パターン、iv) 東経125度線に沿って北上する型では、降雨が早期に始まるものと遅い時点に始まるものに分れる2パターン、v) 中国大陆に向かう北西進型では1パターン、vi) 東経140度線に沿って北上する型では2パターンとなった。さらに、代表ハイドログラフは、これら代表ハイエトグラフに流出解析（例えば、貯留関数法）を適用して求めることができる（図-3、4参照）。

3. 3 ルールベースの作成

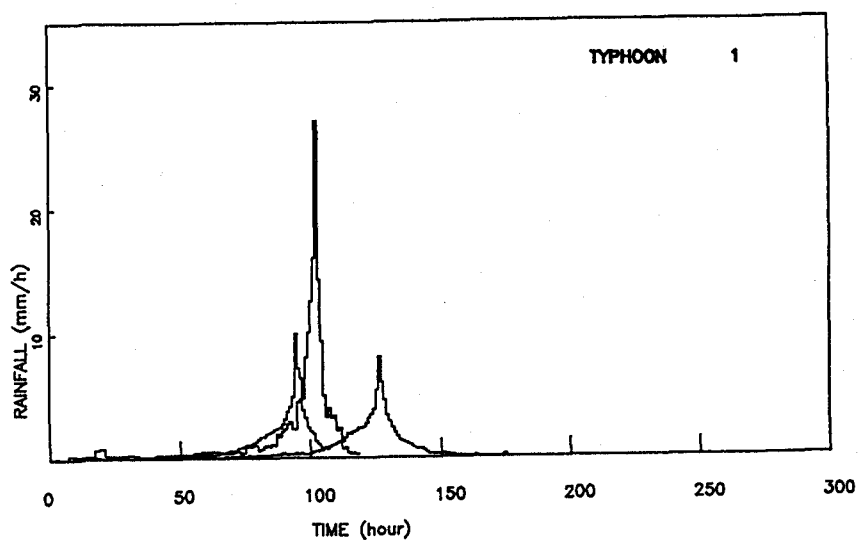


図-3 台風経路1で分類されたハイエトグラフ

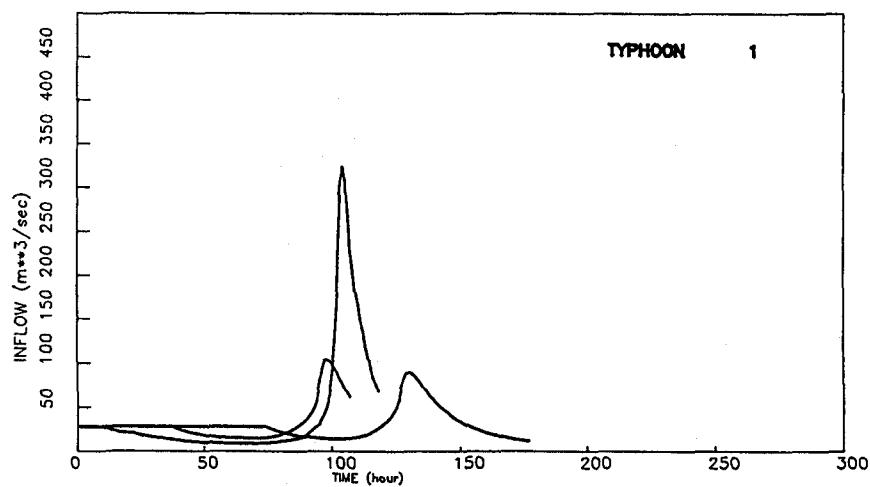


図-4 台風経路1で分類されたハイドログラフ

ファジィ制御を実プロセスに適用するには入出力変数を決定し、制御規則を作成する必要がある。前件部命題を定めるために、入力変数を選択し各入力変数に対するファジィ変数の決定すなわちファジィ分割（大きい、小さいなどの領域分割）を行なう。後件部命題はプロセスの操作量として出力変数はおのずから定まる。ルールベースは全体として事実と結論を結び付けるAND/ORトリートを構成し、データベース内の事実に基づいてこのトリートを評価する作業が推論である。通常の前向き推論ではデータ・ベースの内容に基づいてルールの前件部（IF部）を評価し、条件を満たしたらそのルールの後件部（THEN部）を実行し、データベースを更新するという操作から行なわれる。したがって、推論はルールの選択と実行の単純な繰り返しになる。

放流量の決定に先だって、現在観測されている台風と前述のパターン分類された代表台風との類似度を求め、代表台風のもつ代表ハイエトグラフ、ハイドログラフを類似度に応じて合成し、仮想（予測）ハイエトグラフ、ハイドログラフが求められる。この予測ハイドログラフの規模に応じて知識を選択し、ハイドログラフ、流入量、貯水量との類似度を求め放流量が決定される。よって、知識を選択する場合のIF-THEN形式における前件部の要素は、台風、ハイエトグラフ、ハイドログラフとなり、後件部は、洪水規模に対処する知識となる。すなわち、

$$\text{IF } \text{TYP}=\text{FTYP}(i), \text{HYE}=\text{FHYE}(j) \text{ and } \text{HYD}=\text{FHYD}(k), \text{ THEN } \text{KNB}=\text{KB}(i, j, k) \quad (5)$$

である。ここに、TYPは台風、FTYP(i)は台風に関するファジィ集合、HYEはハイエトグラフ、FHYE(j)はハイエトグラフに関するファジィ集合、HYDはハイドログラフ、FHYD(k)はハイドログラフに関するファジィ集合、KNBはファジィ空間i, j, kにおける選択された知識である。

放流量を決定するIF-THEN形式における前件部の要素は、ハイドログラフ、流入量、貯水量となり、後件部の要素は放流量となる。すなわち、

$$\text{IF } \text{HYD}=\text{FHYD}(l), \text{QI}=\text{FQI}(m) \text{ and } \text{S}=\text{FS}(n), \text{ THEN } \text{QO}=\text{QR}(l, m, n) \quad (6)$$

である。ここに、HYDは流入量系列、FHYD(l)はハイドログラフに関するファジィ集合、QIは流入量、FQI(m)は流入量に関するファジィ集合、Sは貯水量、FS(n)は貯水量に関するファジィ集合、QOはファジィ空間l, m, nにおける放流量である。

さて、オペレータが操作するとき、その操作量は状況に応じて変化する。その状況を前件部の入力情報についてファジィ分割と、台風、ハイエトグラフ、ハイドログラフについてはパターン分類されたものが、そのままファジィ分割された一つの要素となる。

例えば、貯水量に関しては5つのファジィ空間に分割することができる。

常時満水位の100%	FS(5)	large
常時満水位の75%	FS(4)	more or less large
常時満水位の50%	FS(3)	medium
常時満水位の25%	FS(2)	more or less small
常時満水位の0%	FS(1)	small

また、流入量に関しても5つのファジィ空間に分割することができる。

計画高水流量の100%	FQI(5)	large
-------------	--------	-------

計画高水流量の 75%	F Q I (4)	more or less large
計画高水流量の 50%	F Q I (3)	medium
計画高水流量の 25%	F Q I (2)	more or less small
計画高水流量の 0%	F Q I (1)	small

もちろん、必要に応じてもっと細かく、あるいは、特異なケースを追加することもできる。これらハイドログラフ、貯流量、流入量の組み合わせに対して最適制御理論（例えば、Dynamic Programming）を適用し、得られた最適放流量⁴⁾を後件部出力と見なして、I F - T H E N形式に並べたものがルールベースとなる。

ところで、ルールベースを作成するにあたり、操作を洪水規模3通り、代表ハイドログラフ15通り、流入量5通り、貯水量5通りに分割されるとき、1125個のルールベースが得られることになる。しかし、これだけの膨大な量のルールでは処理速度を下げるばかりでなく記憶容量も大きく、計算機上あまり有効な結果をもたらさない。そこで、現実には有り得ないルールの組合せを省略すルールの集約化が要求される。台風によっては、その台風による洪水が他の台風においては中、小規模などということもあり、他の台風のルールで補うことができる。こうしたルールを除外すると、約230個程度に減らすことも可能である。

3. 4 推論機構

制御規則を用いたファジィ推論の演算方法としては、推論の合成則がよく知られている。しかし、複雑な演算が多く、演算時間が長くなるので、実用化を目指すには、演算アルゴリズムの簡便さと現場のオペレータの分かりやすさも考慮しなければならない。さらに、推論アルゴリズムも熟練オペレータの操作判断に近く、なじみやすいことが要求される。そのため、演算が簡単で、かつ、効率の高い計算方法として菅野が提案しているファジィ制御理論⁵⁾を導入しよう。

(a) 知識ベースからの情報

ある台風を特性づける要因として、X_{ni}（東経）、Y_{ni}（北緯）の2つの要素を考える。当該台風についてパターン分類された台風との類似度を以下のようにして求める。

①時刻Tにおけるクラスターセンターiと現台風との距離d_i(t)を求める。

$$d_i(t) = \min_{ti} \{ \max_t |X(t) - Z_i(t_i)| \} \quad (7)$$

②距離d_i(t)を用いて、類似度を表わすメンバーシップ値を次式より算定する。

$$f_{typ}(i) = \frac{\sum_{t=1}^T W(t) (-|d_i(t)| + atyp) / atyp}{\sum_{t=1}^T W(t)} \quad (8)$$

ここに、atypはメンバーシップ関数の傾きで定数である。また、W(t)は、現在と過去の情報の重要度を表わすための重み、

$$W(t) = 0.5 * T - t + 1 \quad (9)$$

である。

③類似度 $f_{typ}(j)$ が各々の代表台風について得られるので、この類似度を用いて現台風の進路の予測を行なう。そのため、類似度の高い2つの代表台風を用いて進路予測を行なう。式(6)を満足させる点を選び、代表台風における現在の位置 $RETY(b_i, t_1)$ を探す。ここで、 b_i は類似度の高い2つの代表台風の番号を表わし、 t_1 は代表台風における現在の位置を表わす。従って、今後12時間先までの台風の予測位置は次式より求められる。

$$PRETY(t) = \frac{\sum_{b_i} f_{typ}(b_i) \cdot RETY(t_1)}{\sum_{b_i} f_{typ}(b_i)} \quad t_1 \leq t \leq t_1 + 12 \quad (10)$$

台風の進路と降雨の分布状況はかなり相関が高いので、現在観測されている降雨量と今までの台風を用いて降雨予測を試みよう。類似度の高い2つの代表台風と現在観測されている降雨量系列、流入量系列間の類似度を求める。

ハイエトグラフのメンバーシップ関数 $f_{HYE}(b_i, j)$ は以下の様に定義する。

$$f_{HYE}(b_i, j) = \max \{ (-|DSE(b_i, j)| + AHYE) / AHYE, 0 \} \quad (11)$$

$$DSE(b_i, j) = \min_{t_0} \max_t \{ |HE(t) - FHE(b_i, j, t_0)| \} \quad (12)$$

ここに、 $DSE(b_i, j)$ は代表台風 b_i におけるハイエトグラフ j と現ハイエトグラフ HE との距離である。 $AHYE$ はハイエトグラフのメンバーシップ関数の傾きを表わす定数である。

ハイエトグラフの予測は、類似度 $f_{HYE}(b_i, j)$ の中で類似度の高いものより2個、つまり、類似度の高かった代表台風1つにつき2つ選ばれるので4個のハイエトグラフを用いて予測ハイエトグラフが形成される。具体的には

$$PREHYE(t) = \frac{\sum_{b_i} \sum_{b_j} f_{HYE}(b_i, b_j) \cdot REHYE(t)}{\sum_{b_i} \sum_{b_j} f_{HYE}(b_i, b_j)} \quad t_2 \leq t \leq t_n \quad (13)$$

となる。ただし、 $PREHYE(t)$ は予測ハイエトグラフを表わし、 t_2 は式(11)を満足させるときの予測ハイエトグラフにおける現在時刻を表わす。また、 t_n は予測可能な範囲までの時刻を表わす。

次に、ハイドログラフのメンバーシップ関数 f_{HYD} は以下のように設定する。

$$f_{HYD}(b_i, j) = \max \{ (-|DSD(b_i, j)| + AHYD) / AHYD, 0 \} \quad (14)$$

$$DSD(b_i, j) = \min_{t_0} \max_t \{ |QI(t) - FHD(b_i, j, t_0)| \} \quad (15)$$

ここに、 $DSD(b_i, j)$ は代表台風 b_i におけるハイドログラフ j と現流入量系列との距離を表わし、 $AHYD$ はハイドログラフのメンバーシップ関数の傾きを表わす定数、 $FHD(b_i, j, t_0)$ は代表台風 b_i における代表ハイドログラフ j である。

結局、ハイドログラフの予測もハイエトグラフの予測と同様に行なうと、以下のようになる⁶⁾。

$$PREHYD(t) = \frac{\sum_{b_i} \sum_{b_j} f_{HYD}(b_i, b_j) \cdot REHYD(t)}{\sum_{b_i} \sum_{b_j} f_{HYD}(b_i, b_j)} \quad (16)$$

(b) 知識ベースの選択

台風進路の類似度、予測進路、ハイエトグラフの類似度、予測ハイエトグラフ、ハイドログラフの類似度、予測ハイドログラフが求められると、これらの情報と、流入量、貯水量を用いて計算放流量を決めなければならない。洪水流量の累加量のピーク値は放流量決定の目安と考えられるので、知識ベースを選択する要因として予測ハイドログラフのピーク流量を採用する。そこで、ピーク流量により洪水の規模のメンバーシップ関数を以下のようにする⁷⁾。

$$FK(\text{Small}) = \begin{cases} 1 & (PQI < BFKS) \\ \max \{ (-|PQI - BFKS| + AFKS) / AFKS, 0 \} & (PQI \geq BFKS) \end{cases} \quad (17)$$

$$FK(\text{Medium}) = \begin{cases} \max \{ (-|PQI - BFKM| + AFKM1) / AFKM1, 0 \} & (PQI < BFKM) \\ \max \{ (-|PQI - BFKM| + AFKM2) / AFKM2, 0 \} & (PQI \geq BFKM) \end{cases} \quad (18)$$

$$FK(\text{Large}) = \begin{cases} \max \{ (-|PQI - BFKB| + AFKB) / AFKB, 0 \} & (PQI < AFKB) \\ 1 & (PQI \geq AFKB) \end{cases} \quad (19)$$

ただし、AFKS, AFKM1, AFKM2, AFKBはメンバーシップ関数の傾きを表わす定数、BFKS, BFKM, BFKBはメンバーシップ値が1となる値で、ここでは、ピーク流量による洪水の規模を表わす定数である。これらの洪水の規模に関する類似度を求め、その類似度があるしきい値を超えたらその知識が選択されるわけである。

(c) 放流量の決定

放流量決定のルールは式(16)のファジイ制御アルゴリズムに従って進められる。ここで、各ルールの類似度は以下の関数より求める。ハイドログラフの類似度はすでにわかっているので、流入量、貯水量に関する類似度を求めるだけでよい。ゆえに、流入量、貯水量のメンバーシップを

$$fQI(QI) = \max \{ (-|QI(t) - bQIm| + aQI) / aQI, 0 \} \quad (20)$$

$$fS(S) = \max \{ (-|S(t) - bSn| + aS) / aS, 0 \} \quad (21)$$

と設定する。ただし、aQI, aSはメンバーシップ関数の傾きを表わす定数で、bQIm, bSnはメンバーシップ関数のグレードが1になる値、つまり、ファジイスコープに対応する定数である。以上より、制御規則の適合度Wlmnは

$$Wlmn = \frac{fHYDe(DSD) + fQIe(QI) + fSe(S)}{3} \quad (22)$$

で算定される。選択された知識(制御規則)全てに対して適合度を求めると、放流量は高さ法を用いて、

$$Q0 = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Wlmn \cdot QR(1, m, n)}{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Wlmn} \quad (23)$$

と算定される⁸⁾。この計算上の仮想放流量はファジイ推論と知識の選択により内挿値として求められており、実際には、知識に含まれない異常出水への対応が必要である。そこで、新たに”ずれ”として

$$DS' (bi, j, t) = (\text{sign}) \min_t \left[\max_{t_0} \left\{ \frac{|QI(t) - fHYD(bi, j, t_0)|}{fHYD(bi, j, t_0)} \right\} \right] \quad (24)$$

を定義する。すると、放流量QR (1, m, n) をDS' に応じて

$$MQR (1, m, n) = \{1 + DS' (bi, j, t)\} \cdot QR (1, m, n) \quad (25)$$

と変更し修正放流量とする。ただし、(sign)は距離が+側か-側かを示す記号である。その結果、ファジィ制御式(23)より計算放流量が得られる。

4. 短期間でのチューニング操作

1時間毎の水文観測を基にした放流量に対して、貯水池内の状態観測が短時間間隔で行われるとよりスムーズな制御結果を得ることができる。ここでは、入力情報や知識が少なくてすむチューニング理論を導入し、全体として知識ベース型操作の推論結果に近づけ、システムの負担を軽減し、かつ、洪水の危険度の低下を図ろう⁹⁾。なお、チューニングとは、“入力・出力があるシステムにおいて、入力情報により出力を算定し、目標値に近づけること”と定義する。

貯水池操作において、入力を貯水量、出力をゲート操作量としてチューニング理論をモデル化しよう。得られている情報としては、時刻tにおける貯水量S (t)，推論結果で得られた1時間後の貯水量S (t + 1)である。流入量はその間に変動があるとして外乱とみなす。この2つの情報より10分後毎の目標貯水量S (n) が得られる。ここで、nは時刻tとt + 1 (n = 1, ..., 6) 間での10分毎の各制御時刻を表す。今、目標貯水量と実際の貯水量の偏差をEn、ゲートの操作量をUnとすると、

$$Un = k \cdot O(n) \quad (26)$$

であり、偏差と操作量の変化量は

$$\begin{aligned} \Delta En &= En - En-1 \\ &= S(n) - S(n) - S(n-1) + S(n-1) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Delta U = Un - Un-1 \quad (28)$$

となる。ここに、O (n) は放流量、k はパラメータである。これらを用いて制御規則を表現すると、

$$\text{IF } E = PB \text{ and } \Delta E = ZO, \text{ THEN } \Delta U = PB \quad (29)$$

のようになり、表-1のようにまとめることができる。また、偏差Eのメンバーシップ関数は、

$$fE(E) = \max \{ (-|E - bE| + AdE) / AdE, 0 \} \quad (30)$$

$$fdE(\Delta E) = \max \{ (-|\Delta E - bdE| + AdE) / AdE, 0 \} \quad (31)$$

と設定することができる。ただし、bE, bdEはメンバーシップ関数の値が1になる値で、E, ΔEの状態を表す代表値に相当する。AE, AdEはメンバーシップ関数の傾きを表すパラメータである。よって、それぞれの制御規則の適合度Wijは、相加平均法を用いると、

表-1 チューニング時の制御規則

		ΔE						
		dENB	dENM	dENS	dEZO	dEPS	dEPM	dEPB
E	ENB				NB	NM		
	ENM				NM			
	ENS			NM	NS	ZO		PM
	EZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	EPS	NM		ZO	PS	PM		
	EPM				PM			
	EPB			PM	PB			

NB:Negative Big, NM:Negative Medium, NS: Negative Small, ZO:Zero,
PS:Positive Small, PM:Positive Medium, PB:Positive Big

$$W_{ij} = \frac{fE_i(E) + fdE_j(\Delta E)}{2} \quad (32)$$

となる。ただし、表-1において、空白の部分の適合度 W_{ij} は0である。結局、修正操作量 ΔU は、

$$\Delta U_n = \frac{\sum_i \sum_j W_{ij} \cdot \Delta U_{ij}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \quad (33)$$

となり、時刻 n におけるゲート操作量は、

$$U_n = U_{n-1} + \Delta U_n \quad (34)$$

で求められる。

5. 実ダムでの適用結果とその考察

本実時間操作の適用例として、次のようなダムを取り上げよう。

有効貯水容量	23,800,000 (m ³)
利水容量	15,400,000 (m ³)
洪水調節容量	8,400,000 (m ³)
計画高水流量	1100 (m ³ /sec)

5. 1 パラメータ同定

メンバーシップ関数のパラメータATYP, AHYE, AHYD, AQI, ASを非線形最適化手法の1つである最急降下法を用いて決定する。すなわち、初期値として適当なパラメータの組み合わせを考える。次に、各パラメータをある微少値、 $\Delta ATYP$, $\Delta AHYE$, $\Delta AHYD$, ΔAQI , ΔAS だけ動かし、目的関数の値を算定する。得られた5種類の移動方向の中で、最も目的関数が改善されたものを1次解とする。その解の組み合わせより、同様にパラメータを微少値動かし改善方向を探る。この手順を繰り返し行い、解が改善されなくなれば、最適解とみなすのである。また、目的関数は全出水記録におけるシミュレーションとなり、放流量系列におけるピークの平均値の最小をとり、

$$OF = \sum R P \longrightarrow \min \quad (35)$$

とする。ここで、 RP は放流量のピーク流量を表す。得られたパラメータは $ATYP=5.0$ 、 $AHYE=10.0$ 、 $AHYD=302.0$ 、 $AQI=300.0$ 、 $AS=2100000.0$ である。次に、チューニング操作に用いるパラメータ B は、1時間当りの流入量が $0\text{m}^3/\text{sec}$ から $1200\text{m}^3/\text{sec}$ 以上に変化した場合を危険な状態とみなすと、 $EPB=2160000$ 、 $EZO=0$ 、 $EPM=1440000$ 、 $EPS=720000$ とできる。また、 ENB 、 ENM 、 ENS は逆の考え方に立ち、流入量が1時間当り $1200\text{m}^3/\text{sec}$ 以上から $0\text{m}^3/\text{sec}$ に変化した場合を想定し、 $ENB=-2160000$ 、 $ENM=-1440000$ 、 $ENS=-720000$ とする。偏差の差 ΔE についても、同様に、流入量が1時間当り $0\text{m}^3/\text{sec}$ から $1200\text{m}^3/\text{sec}$ 以上への変化に対応し、 $dEZO=0$ 、 $dEPS=220000$ 、 $dEPM=440000$ 、 $dEPB=660000$ 、 $dENB=-660000$ 、 $dENM=-440000$ 、 $dENS=-220000$ とする。

5. 2 台風の類似度と予測進路

台風状況の把握のために作成した表示画面を図-5に示す。図中、左側の図が予測進路を表す。太実線、細実線は、それぞれ、類似度の高い代表台風を表し、中実線が現在までに観測された台風進路、破線が予測された今後の進路、現在地点（細い×印）より上側へ伸びる実線は実際の進路を表している。また、小円、大円はそれぞれ6時間、12時間後の予測された台風の位置である。予測進路は台風パターン1、パターン2より推論された結果である。3時間後までは実際の進路と大差はないが、それ以後はパターン2の類似度がパターン1よりも高いため、パターン2に沿う進路を予測している。この類似度では、過去の情報より最新の情報ほど重要度が高いため、北緯20度から北緯25度付近の当該台風と代表台風との距離は類似度にあまり反映されていない。目視的にはパターン3の方が類似度が高いように思われるが、台風情報の重要度の違いにより類似度は約0.55にすぎない。制御開始時刻から12時間経過した場合の予測進路では、一層、パターン1の類似度が制御開始時に比べ高くなってくる。

5. 3 ハイエトグラフ、ハイドログラフの予測結果

類似性の高い代表台風が抽出されると、予測ハイエトグラフ、予測ハイドログラフを求めることができる。制御開始後56時間目の状況を図-6に示す。図中の左側の図は、上側がそれまでのハイエトグラフ（中実線）と、予測ハイエトグラフ（太実線）を表している。下側がそれまでのハイドログラフ（中実線）、予測ハイドログラフ（太実線）、実際のハイドログラフ（細実線）を表している。2～3時間先までには、予測と実際のハイドログラフは似ているが、それ以降は精度の低いものとなっている。ここで、右側の図は上側が貯水量の推移、下側の左の図は現在から過去5時間分の流入量と降雨量の推移、下側の右の図は現在から過去5時間分の貯水量の推移を表している。本台風が過去のパターンとは異なる進路、異なる降雨分布であったため、本システムが予測したハイエトグラフ、ハイドログラフは精度の低いものとなっている。類似度だけでハイエトグラフ、ハイドログラフを予測しているため予測値は実際の値より小さくなり、精度が低くなる原因の一つであろう。

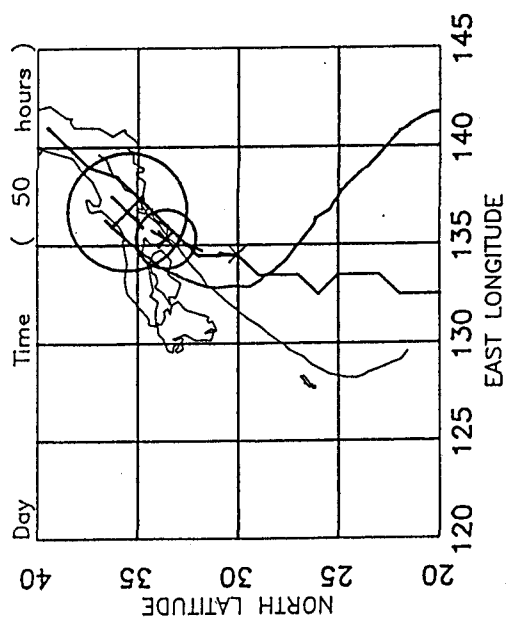
5. 4 貯水池実時間操作の適用結果

貯水池実時間操作においては、予備放流時期が関係するため制御開始時刻を決めることは困難である。そこで、ダム管理者への意志決定支援のため、貯水池操作の開始、終了を以下の手順で簡略的に判断する。まず、各時点において、台風情報を基にした予測ハイドログラフを作成しているので、予測ハイドログラフより洪水基準値を超える時刻 t_n を求める。基準値を超えなければ操作は行なわれな。いったん流入量が洪水基準値を超えたら、次に流入量が基準値を下回るまで制御を続けることになる。現時刻を t 、予測ハイドログラフを $PREHYD(t)$ 、洪水基準値を QD とすると、

$$PHY(t_n) \geq QD \quad (36)$$

となる時刻が t_n である。得られた t_n を用いると

- | | | | | |
|------|----|-----------------------|------|--------|
| I) | IF | $t < t_n$ | THEN | 制御をしない |
| II) | IF | $t = t_n$ | THEN | 制御を始める |
| III) | IF | $t > t_n$ | THEN | 制御を続ける |
| IV) | IF | $t > t_n, QI(t) < QD$ | THEN | 制御を終える |



TYPHOON INFORMATION

N.L. = 30.00
 E.L. = 134.50
 Pressure (mb) = 926.00

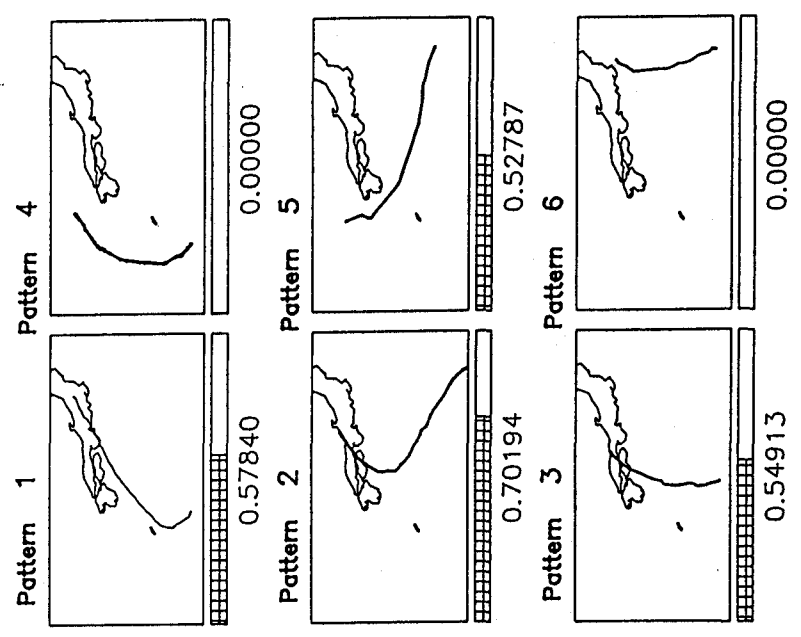


図-5 台風の現在と予測位置

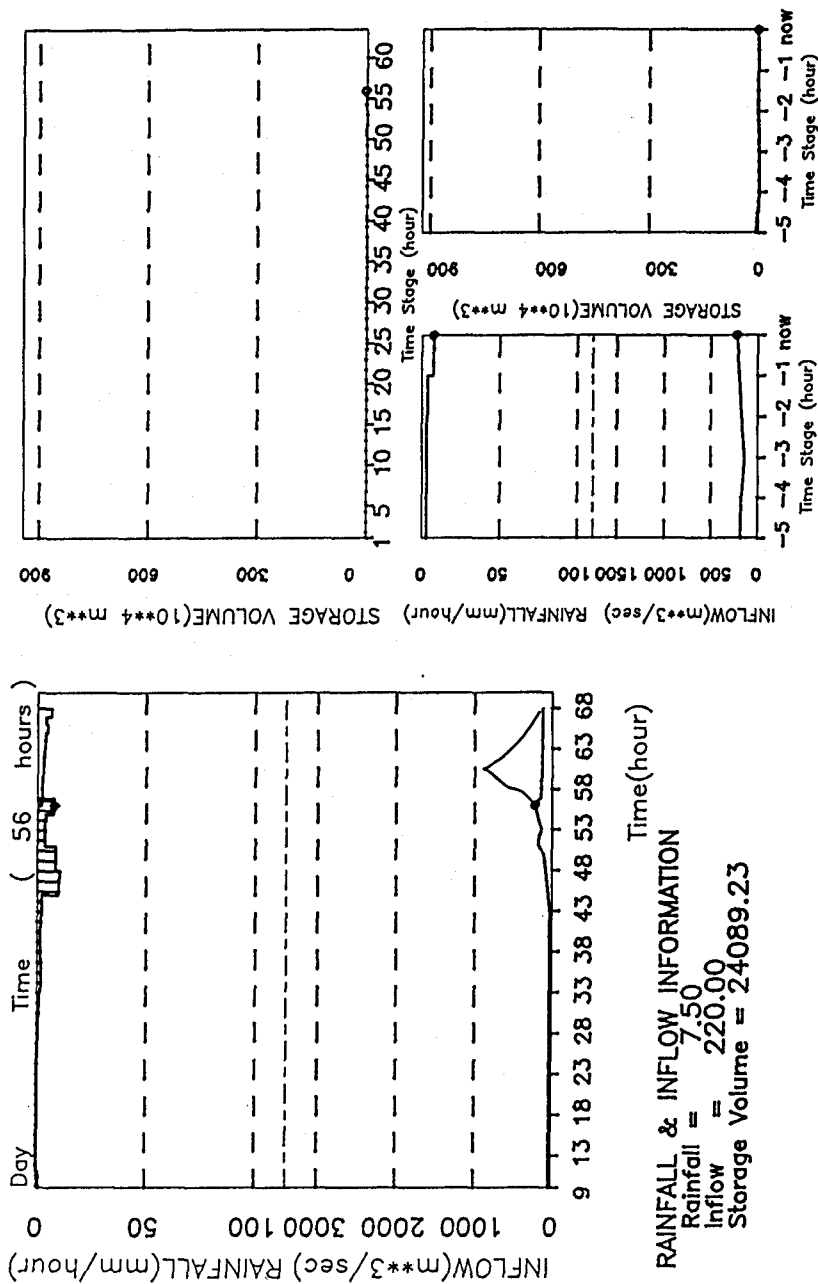


図-6 制御・予測状況の表示

V) IF 貯水量が多い THEN 制御を行なう

のルールが作成できる。このルールを基に、貯水池操作の開始・終了時期の判断が行なわれる。

いま、制御単位を1時間とし、1時間毎に全観測データが更新されているとして、平均的な流入・放流を対象に実時間操作を適用してみよう。制御結果は図-7のとおりである。初期貯水量は 0 m^3 である。図は上側が貯水量の推移を表している。適用ケースでは、台風の観測が始まると同時にシステムは作動している。台風が観測され始めてから48時間後までは前述のルールI)が選ばれ、49時間後にルールII)、72時間後にルールIV)が選ばれている。また、59時間後から62時間後は予測ピーク流量が $1000\text{ m}^3/\text{sec}$ を超えると判断したため、推論結果は $600\text{ m}^3/\text{sec}$ を選択している。

続いて、1時間毎の貯水池操作に10分毎のチューニング操作を加えたものを考えてみよう。図-8は操作が行なわれている部分を拡大したものである。上側は貯水量の推移、下側は流入量(実線)、放流量(破線)を表している。全体的に、10分毎に目標貯水量が変化しており、それに追従するように誤差が大きくなり目標貯水量を下回る傾向がある。この原因としては、ルールベースの構成、あるいはチューニング操作が1時間に5回しか行われていないことによるものであると思われる。しかし、既往最大洪水にも対処しており、チューニング操作は微少な変動がある流入量に対して極めて有効であることがわかる。

5. 5 欠測のときの貯水池実時間操作

情報に欠測がある場合には、これを補うためにルールベースの構造を作り変える必要がある。具体的には、ルールベースの前件部要素を減らすことになる。すなわち、式(5)において台風情報が欠測となった場合、

$$\text{IF } \text{HYE}=\text{PHYE}(j) \text{ and } \text{HYD}=\text{PHYD}(k), \text{ THEN } \text{KNB}=\text{NB}'(i, j, k) \quad (37)$$

となる。ここで、 $\text{NB}'(i, j, k)$ はHYEとHYDの組み合わせ $j \times k$ に対してそれぞれ i 個あるため($\text{NB}'(1, j, k), \text{NB}'(2, j, k), \dots, \text{NB}'(i, j, k)$)個の知識があることになる。欠測に対してあいまい性の分布を再構成するため、それぞれ i 個の知識の平均値をとる方法を採用し、台風観測開始後46時間から57時間の12時間分の台風情報を欠測として適用したものを図-9に示す。結束していない場合と比べ、欠測期間中はやや放流量は多くなっている。これは、台風情報による知識の選択がハイエトグラフ、ハイドログラフだけによって行なわれ、中規模の知識が式(37)により選ばれるためであろう。

6. あとがき

本研究では、知識ベース型エキスパートシステムの作成を目的として、ファジイパターン分類(ソフトクラスタリング)、Dynamic Programmingを用いてルールベースを求めると共に、ファジイ理論による実時間ダム操作を検討したものである。すなわち、台風進路、ハイエトグラフ、ハイドログラフの予測情報をもとに、知識ベース型実時間操作を行い、ダム管理者の意志決定支援を策定したものである。

台風のパターン分類には、しきい値を有するソフトクラスタリング手法を用いた。ハイエトグラフに関しても同様の分類化を行い、洪水の規模とハイドログラフの予測を行った。ファジイ制御による貯水池操作は、操作の妥当性を考え、現貯水量、流入量、代表ハイドログラフの3つの要素を取り入れた。ファジイ制御則による操作規則はプログラム化が容易であるとともに、操作結果に不都合があ

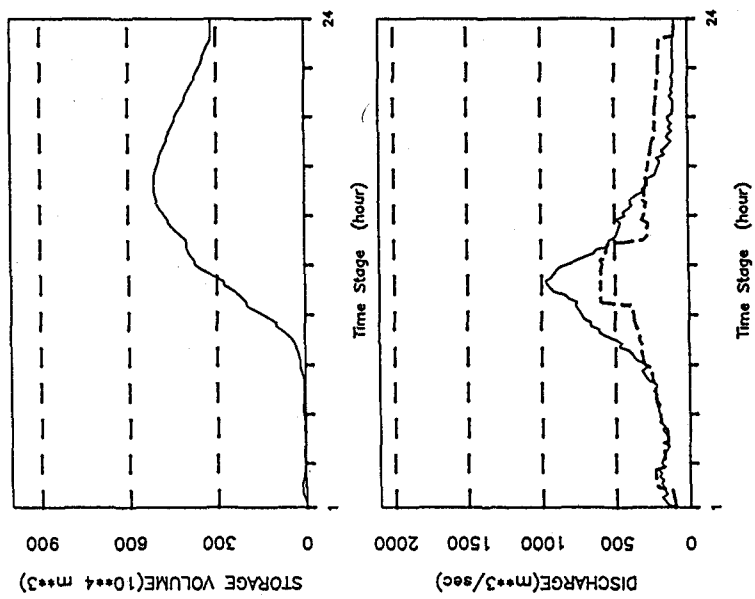


図-7 貯水池操作結果

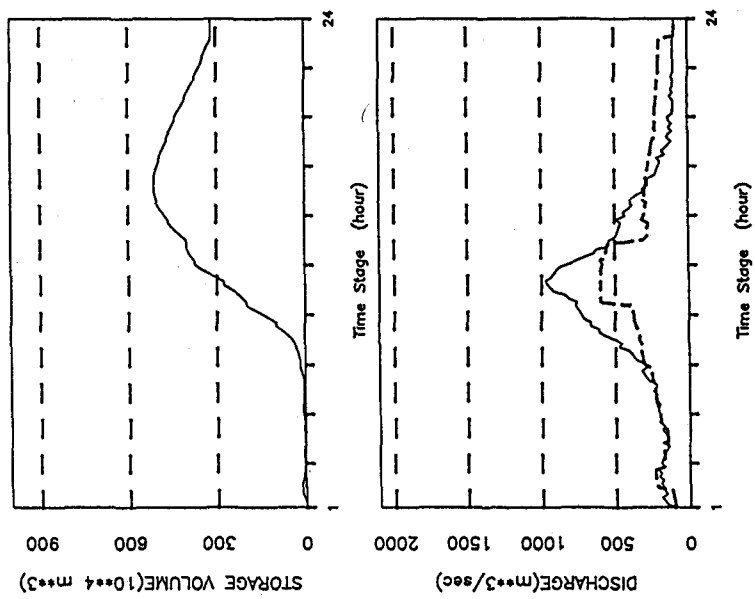


図-8 チューニング操作結果

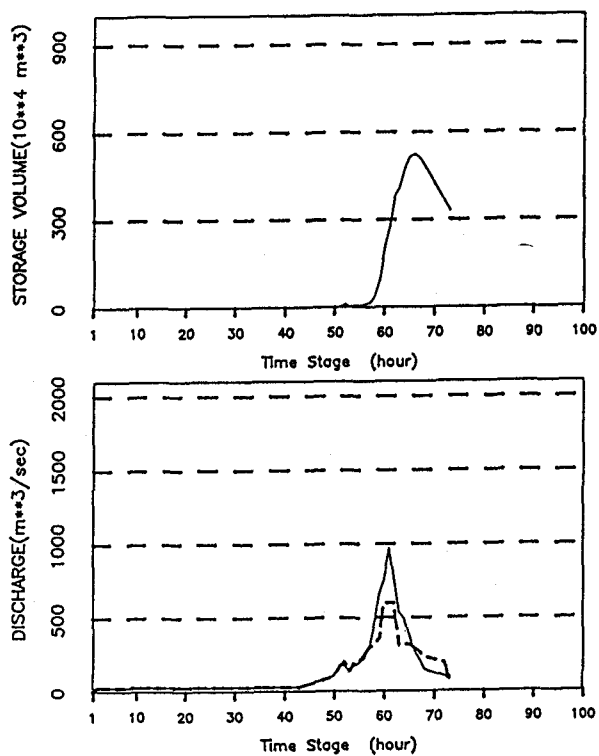


図-9 欠測情報のもとでの操作結果

れば、操作規則あるいはメンバーシップ関数の変更によって、オペレータまたはダム管理者の意向に沿った操作が可能であるといえる。

今後、衛星・レーダデータ、アメダス等の広域的気象・水文情報の取入れ、ニューラルネットワーク、認知工学等のAI手法の導入のより、実管理者に信頼されうる意志決定支援システムとなるであろう。

参考文献

- 1) 上野晴樹：知識工学入門、オーム社、1987、pp.43-48
- 2) J.T. Tou and R.C. Gonzalez: Pattern Recognition Principles, Addison-Wesley Publishing Company, Vol. 7, 1974, pp. 94-95
- 3) S.Z. Selim and M.A. Ismail: Soft Clustering of Multidimensional Data: A Semi-Fuzzy Approach, Pattern Recognition Vol. 17 No. 5, 1984, pp. 559-568
- 4) 高埴琢馬・瀬能邦雄：ダム群による洪水調節に関する研究(Ⅰ)-DPの利用とその問題点-、京都大学防災研究所年報、第13号、1970、pp. 83-103
- 5) 菅野道夫：ファジィ制御、日刊工業、1988、pp. 74-84
- 6) 伊藤 修：ファジィコントローラ、サイエンス社、数理科学2月号、1987、pp. 55-58
- 7) T. Kojiri, S. Ikebuchi and H. Yamada: Basinwide flood control system by combining prediction and reservoir operation, Stochastic Hydrology and Hydraulics, 3, 1989, pp. 31-49
- 8) 水本雅晴：わかりやすいファジィ理論Ⅲ-ファジィ理論とファジィ制御-、コンピュータロール28、コロナ社、1989、pp. 32-45
- 9) B.P. Graham and R.B. Newell: Fuzzy Adaptive Control of a First-order Process, Fuzzy Sets and Systems, 31, 1989, pp. 47-65