

知識獲得型の貯水池支援システムのモデル化

小尻 利治・友杉 邦雄・花谷 慎太郎*

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、実時間の貯水池支援システムの構築目標として、管理者に理解しやすい操作形態の提案を行うものである。すなわち、人工知能やファジイ理論などのAI技術を用い、現行の操作規則を対象として、洪水資料が少ない場合に知識を形成していくと共に、対象台風の異常性を評価し操作体制の早期始動を可能とする知識獲得型の支援システムの作成を対象とするものである。

キーワード：貯水池操作、支援システム、ファジイ推論、異常台風

1. はじめに

平成10年はいくつもの台風が日本に上陸し、大きな被害をもたらした。台風によって引き起こされる洪水に対する貯水池操作の重要性が見直された年でもあった。洪水時における貯水池の管理は、情報収集、判断、ゲート操作など短時間に多くの処理をする必要があり、貯水池管理技術者にとって責任が大きいと共に負担のかかる任務である。今後、管理すべき貯水池数が増加するのに対して、その熟練管理技術者の数は減少していくことが予想される。その対策として、管理しやすい貯水池操作手順の確立と理解しやすいディスプレイ表示などハード面での高機能化が進められてきた。しかし、計画対象洪水を越えるような大出水に対しては、管理者の経験不足や予測精度の低さとも合まって十分な制御が行なえていないのが現状である。故に、ソフト的に貯水池管理技術者の判断を支援する貯水池操作支援システムの必要性が強く認識されている。

一方、制御工学的観点からすると、ファジイ理論、ニューラルネットワーク、GA、オブジェクト指向などのAI(人工知能)技術を利用した貯水池操作支援システムとして様々なものが報告されてきた。Kojiri et al. (1990)は貯水池操作とエキスパートシステム

の類似性を考慮して知識ベース型の支援システムを、Kojiri & Sakakima(1993)は放流量の確信度の算定とユーザインタフェースモジュールの作成を試みた。Ito et al. (1996)は、マルチメディアを利用してGUI(Graphic User Interface)を作成した。しかしこれらは、現在までに入手された情報を知識として保存しており、支援システムの重要な要素である知識の定義・評価・追加・変更などを担う知識獲得過程を十分に考慮していない。そこで本研究では、新しいデータを知識として知識ベースに組み込むという知識獲得過程を考慮した貯水池操作支援システムの開発を目指すものである。具体的には、降雨終了後に新しいデータと知識ベース内の情報とを比較し、知識の増加・変更を行なう方法を示す。また、実時間操作では、知識ベースの情報との類似性、対象洪水・台風の異常状況を抽出する方法を提案するものである。

2. 貯水池操作支援システムの概要

2.1 貯水操作における人工知能

人工知能(荒屋, 1992)の目的は、人間の知的作業と同様の処理ができるコンピュータを実現することである。高度な専門的知識をコンピュータにもたせ

ることにより、設計や診断などにコンピュータを用いることが可能になる。また、自然言語や画像理解によって、コンピュータの処理能力の拡大とユーザにとって使いやすいシステムの実現が可能となってきた。こうした人工知能システムのなかで、実用的観点から特に注目されるのが、知的作業への支援システムである。

支援システムには、人工知能的な処理が必要不可欠であり、それ自体が専門的な知識を保有し、通常時だけでなく、異常事態や機能の追加、修復にも臨機応変に対応できなくてはならない。ここで、具備すべき条件を挙げると次のようになる。

- 1) システム自体が専門的な知識を管理する知識ベースを有する。
 - 2) 人工知能的な処理により合理的な演算機構での推論が可能である。
 - 3) 通常の想定しうる状況だけでなく、異常事態にも対応できる。
 - 4) システムの変更や機能の追加が容易にできる。
 - 5) 利用者にわかりやすい解説ができる。
- これらの条件が満たされないと、単なる最適操作演算システムや予測システムに過ぎない。現在の状況がどのような状況で、いかなる処置をとるべきかをガイドするシステムでなければならない。

2.2 支援システムの構成要素

意志決定支援システムは、基本的には推論作業を受け持つ推論機構と知識が蓄えられる知識ベースから構成される。それに付随して、知識の基となるデータベース、知識を定義、変更、追加する知識獲得モジュール、また推論の過程を説明する推論過程説明モジュール、さらにユーザと対話するためのユーザインタフェースモジュールが必要である。簡単にまとめる以下ようになる。

1) 知識ベース

獲得された知識は一定の形で表現され、それが集まって知識ベースが構築される。知識の表現単位、推論の進め方、曖昧性の表現が基本的問題である。

2) データベース

データベースでは過去のデータから、必要なデータをそろえファイル化する。

3) 知識獲得モジュール

知識ベースエディタとも呼ばれる知識獲得モジュールは、きわ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。従って、知識ベース構築の過程で過去の知識と現情報間の矛盾点の発見や解決を迅速に行うことが要求

される。

4) 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、事実を解釈して結論に導き、ユーザにこれを提示し、求めに応じて結論を説明するモジュールである。また、同時に、入力やシステムの異常状況を判断する。

5) 推論過程説明モジュール

知識ベース型コンサルティングシステムでは、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。

6) ユーザインタフェースモジュール

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、意志決定に必要な情報が即時に得られなければならない。

2.3 貯水池操作支援システムの基本フロー

現行の貯水池操作は、各ダム毎に定められている操作規則に従って、一定量放流形式や一定率一定量方式など固定的な方法が用いられている。これらの方法ではダムに流入する流量によって放流量が決定される。この流入量は貯水池の水位変化と放流量から逆算されており、厳密な意味での実流入量とは言えない。ここで問題となるのは、今までに例の無い状況、つまり、異常洪水の発生と操作不能となる過剰放流量の要求がある場合である。そのような異常状況をより早く察知し、迅速な決断・行動を行なうことは、安全かつ理解しやすい洪水調節を行なう上で重要となる。本研究では、貯水池操作支援システムとして次のようなものを提案している。まず、実時間操作においては、現在の対象台風と知識ベース内に蓄えられた過去の台風情報をファジイ理論(菅野, 1988)によって比較する。その類似性を類似度(fuzzy grade)として定義し、異常状況の判定を行なう。異常と判断されない場合は、現行の操作規則に沿った操作を続けるが、過去の操作事例をもとにして危険度(risk grade)を求め、管理者への支援情報を提供する。また、台風通過後には人工知能的処理を実現させるために知識ベースの更新を行なう。通過した台風情報が新たな知識か、あるいは既に蓄えられている知識の一つと同等かを判断し、その知識を組み込み・変更していく知識獲得過程を作成する。ここでは、実時間での異常状況判断過程と同様に、ファジイ推論によって類似度を算定する。その類似度をもとに新しい知識かどうかの認定を行なうことになり、自動的に知識が向上していくという意味から、本過程を知識獲得過程あるいは自己形成過程と呼ぶ。この貯水池操作支援システムの基本フロー

ーを Fig. 1 に示す.

3. 貯水池操作における知識獲得過程

3.1 知識獲得過程の構成

貯水池操作における知識獲得過程では、システムが洪水に対処する経験を重ねるごとに実時間での異常状況の判断力が上がり、操作に関する情報を的確に処理する人工知能を目指すことになる。知識ベース内に格納されている知識が少ない場合、すなわち、幼児段階の知能においては、台風が来るごとにその情報を吸収し成長する過程をモデル化する。言いかえると、新しい知識が得られると、知識ベース内に知識を追加・変更させ、より充実した知識ベースを構築していくことである。

具体的には、知識ベース内の知識と対象台風の情報からファジ理論を用いて類似度(fuzzy grade)を算定する。類似度が小さい場合(経験の無い情報)には、その対象台風を新しい情報として知識ベース内知識に追加する。類似度が大きい場合(よく似た情報)には、対象台風の情報を知識ベース内知識の一つと同じパターンとみなし、従来の知識との総合化により知識を少しだけ変更する(Fig. 2 参照)。

3.2 類似度の算定

3.2.1 天気図の類似度

天気図を特性付ける要因として、台風(中心位置, 中心気圧), 高気圧(有無, 中心位置, 中心気圧), 低気圧(有無, 中心位置, 中心気圧), 前線(有無, 左端位置, 長さ)を考える(Fig. 3 参照)。対象台風の位置が $X(nt)$, $Y(nt)$ で得られ、知識ベース中の第 i 台風の位置を $X(kti)$, $Y(kti)$ とすると、両者の距離は

$$Dt = \sqrt{(X(nt) - X(kti))^2 + (Y(nt) - Y(kti))^2} \quad (1)$$

で得られる。ここで、メンバーシップ関数を

$$ft = \max\{1 - Dt / It, 0.0\} \quad (2)$$

と定義すると類似度が求められる。ここに、 It はメンバーシップ関数の傾きである。同様に中心気圧に関しても対象台風の中心気圧が $P(nt)$ で得られ、知識ベース中の第 i 台風の中心気圧を $P(kti)$ とすると、メンバーシップ関数は距離を

$$Dtp = |Pnt - Pkti| \quad (3)$$

として、

$$ftp = \max\{1 - Dtp / Itp, 0.0\} \quad (4)$$

で得られる。ここに、 Itp はメンバーシップ関数の傾きである。これらのファジ積をとって

$$mft = \min\{ft, ftp\} \quad (5)$$

が台風の位置と強度に関する統合化された類似度となる。次に高気圧に関しては、対象天気図中の高気圧の位置を $X(nh)$, $Y(nh)$, 知識ベース中の第 i 天気図の高気圧の位置を $X(khi)$, $Y(khi)$ とすると、両者の距離は

$$Dh = \sqrt{(X(nh) - X(khi))^2 + (Y(nh) - Y(khi))^2} \quad (6)$$

で得られる。ここで、メンバーシップ関数を

$$fh = \max\{1 - Dh / Ih, 0.0\} \quad (7)$$

と設定すると類似度が求められる。ここに、 Ih はメンバーシップ関数の傾きである。気圧に関しても対象天気図中の高気圧の中心気圧が $P(nh)$ で得られ、知識ベース中の第 i 天気図の高気圧の中心気圧を $P(khi)$ とすると、高気圧と同様の距離 Dhp およびメンバーシップ関数より、類似度は fhp で得られる。高気圧の類似度は、これらのファジ積をとって

$$mfh = \min\{fh, fhp\} \quad (8)$$

となる。低気圧に関しても、対象天気図中の低気圧の位置を $X(nl)$, $Y(nl)$, 知識ベース中の第 i 天気図の低気圧の位置を $X(kli)$, $Y(kli)$ とすると、高気圧と同様に、位置と中心気圧の類似度が fl および flp で与えられる。結局、低気圧としての類似度は

$$mfl = \min\{fl, flp\} \quad (9)$$

となる。また、前線に関しては、対象天気図中の前線の左端の位置が $X(nf)$, $Y(nf)$, 知識ベース中前線の左端の位置を $X(kfi)$, $Y(kfi)$ とすると、距離の概念を用いれば、類似度は ff で求められる。同様に前線の長さに関しても ffp で得られる。ここで、ファジ積

$$mff = \min\{ff, ffp\} \quad (11)$$

が前線の位置と強さの類似度となる。ただし、天気図中に高気圧, 低気圧, あるいは前線が存在しない場合は、それぞれ $mfh=0.0$, $mfl=0.0$, $mff=0.0$ とすればよい。対象天気図と知識ベース中天気図との類似度は、対象天気図中の高気圧の数を Nh , 低気圧の数を Nl , 前線の数を Nf とすると

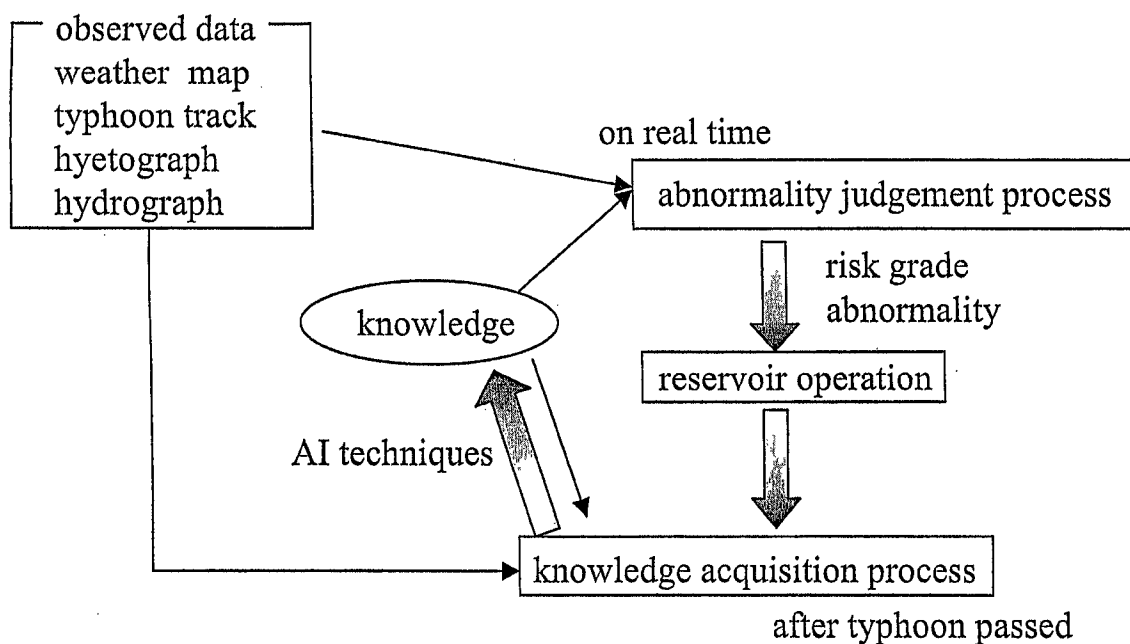


Fig. 1 Computational flow chart of decision support system

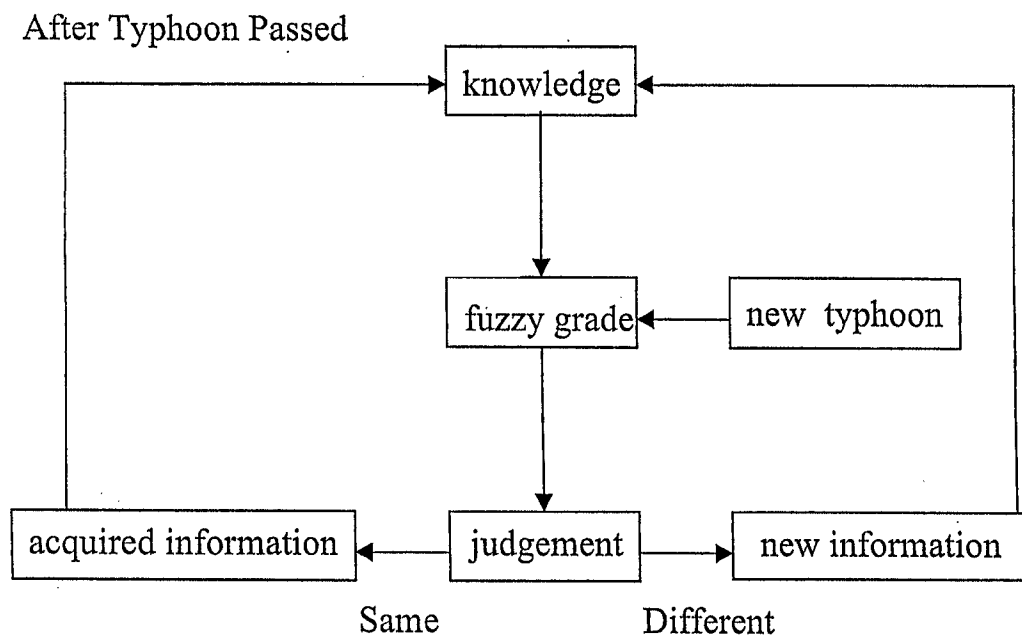


Fig. 2 Knowledge acquisition process for typhoon data

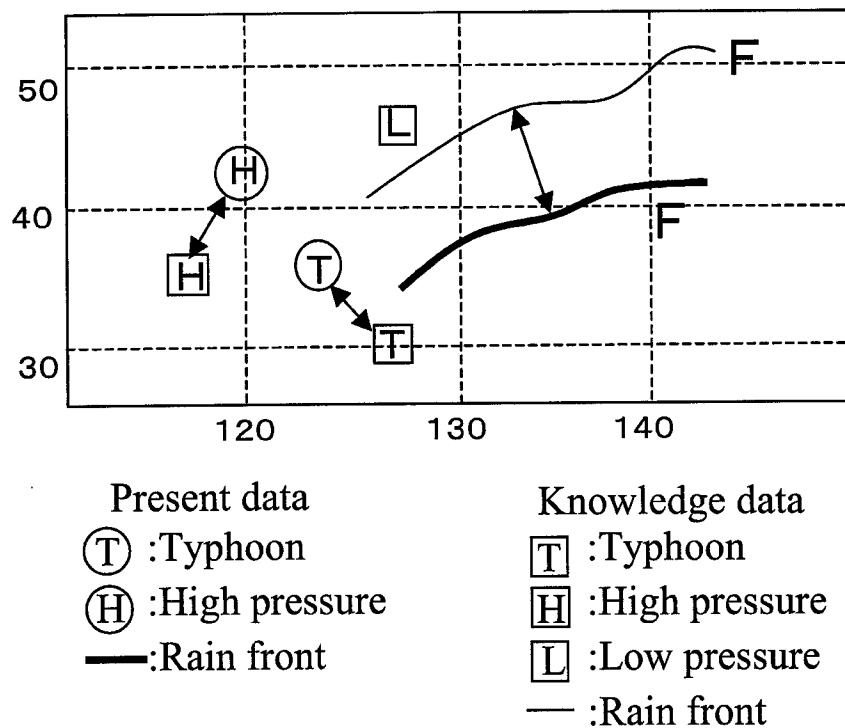


Fig. 3 Calculation procedure of similarities in weather map

on real time

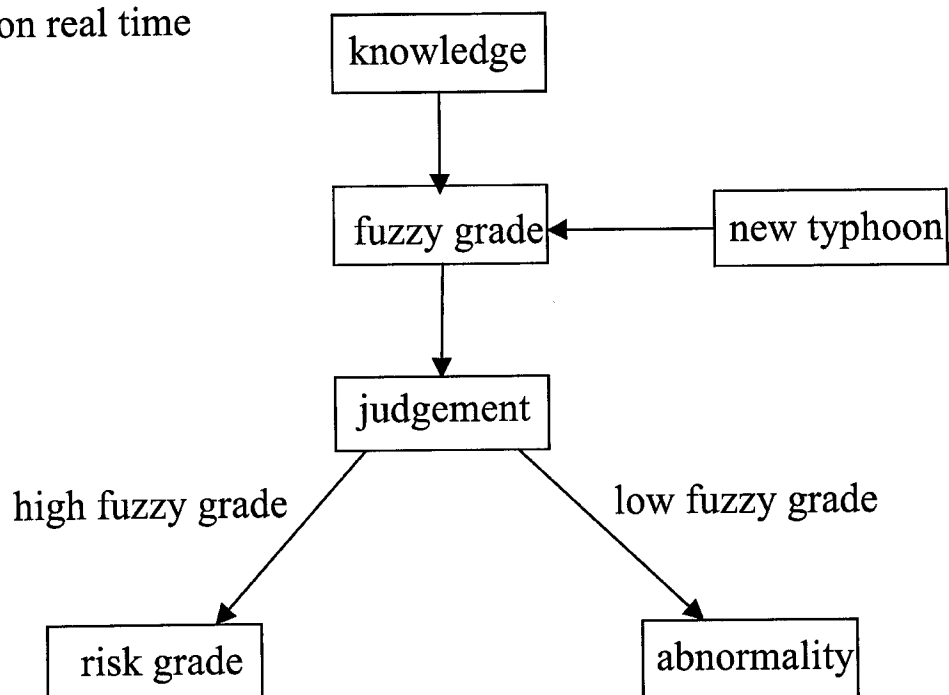


Fig. 4 Judgement process for abnormality of typhoon

$$fwm = \frac{mft + \sum mfh/Nh + \sum mfl/Nl + \sum mff/Nf}{4} \quad (12)$$

で得られる、ただし、天気図内でどれかの要素が存在しないときは、式(11)の分母は4でなく、天気図間に共通して存在するものの個数とする。

3.2.2 台風進路の類似度

台風を特性づける他の要素として進路が考えられる。いま、ある時刻における対象台風の位置座標を東経 $X(ntt, t)$ 、北緯 $Y(ntt, t)$ 、対象台風の時刻 t における位置から最も近い位置にある知識ベース内 i 台風の位置を位置と時刻で表示し、 $X(ktti, ti)$ 、 $Y(ktti, ti)$ とする。ここで、両者の距離を算定し、続いて、それまでの任意の tj において最大となる距離を求め、それを対象台風と知識ベース中の第 i 台風との台風進路距離とする。すなわち、

$$Dtt(s) = \sqrt{(X(rtt, s) - X(ktti, ti))^2 + (Y(rtt, s) - Y(ktti, ti))^2} \xrightarrow{tj} \min \quad (13)$$

$$DTT(t) = \max\{Dtt(s)\} \quad (14)$$

ここで、傾きを Itt で表わすメンバーシップ関数を用いると、類似度は次式で算定される。

$$ftt = \max\{1 - DTT / Itt, 0.0\} \quad (15)$$

3.2.3 ハイエトグラフ、ハイドログラフの類似度

対象台風の降雨強度を $RTHE(t)$ 、知識ベース中第 i 台風の降雨強度を $KTHE(t)$ とする。各時刻における両者の降雨強度の差を取り、その差が最大となる時点を選ぶ。次にズレ De を考慮して知識内ハイエトグラフをずらす。ずらしながらの距離が最大となる時点を選び、各点での最小値を二つのハイエトグラフの距離とする。定式化すると次のようになる。

$$DHE(t) = \left\{ RTHE(s) - KTHE(s - De) \right\} \xrightarrow{De} \min \quad (16)$$

故に、類似度は次式より算定される。

$$fe = \max\{1 - DHE(t) / Ie, 0.0\} \quad (17)$$

ここに、 Ie はメンバーシップ関数の傾きである。同様にハイドログラフの類似度に関する類似度 fd を以下のように求める。

$$DHD(t) = \left\{ RTH(s) - KTHD(s - Dd) \right\} \xrightarrow{Dd} \min \quad (18)$$

$$fd = \max\{1 - DHD(t) / Id, 0.0\} \quad (19)$$

ここに、 $DHD(t)$ は時刻 t における知識ベース中のハイドログラフと対象台風のハイドログラフとの距離、 Dd はズレ、 Id はメンバーシップ関数の傾きである。

3.3 類似性の判定

前節までで、天気図、台風進路、ハイエトグラフ、ハイドログラフの類似度 fwm 、 ftt 、 fe 、 fd が得られた。対象台風と知識ベース内台風との類似性判断のため、知識間のファジイ積と和によって統合化を図る。すなわち、

$$fg = \left[\min\{fwm, ftt, fe, fd\} \xrightarrow{KN} \max \right] \quad (20)$$

ここに、 KN は知識として貯えられている台風情報の総数である。この fg に対して、次の IF-THEN 型判別ルールにより、台風の類似性処理を判断する。

$$\begin{aligned} & \text{IF } fg \geq C, \text{ THEN } T \text{ equal to } Tm \\ & \text{ELSE } T \text{ not equal to } Tm \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 T は対象台風、 Tm は知識ベース中の台風、 C は閾値 ($C: 0 \sim 1$) である。

4. 知識の更新過程

4.1 台風、天気図の合成

対象台風が知識内台風と異なると判別された場合、対象台風の天気図、台風進路、ハイエトグラフ、ハイドログラフの情報は、新しい知識として知識ベースに組み込まれる。一方、同じとみなされた場合は、同じと判定された知識に吸収される。

平均化による新しいパターンでの台風の位置 ($X'(ktm)$, $Y'(ktm)$) は

$$X'(ktm) = X(nt) + (X(nt) - X(ktm)) / 2 \quad (22)$$

$$Y'(ktm) = Y(nt) + (Y(nt) - Y(ktm)) / 2 \quad (23)$$

で得られる。中心気圧 $P'(ktm)$ は

$$P'(ktm) = P(nt) + (P(nt) - P(ktm)) / 2 \quad (24)$$

となる。同様に、高気圧 (中心位置, 中心気圧)、低気圧 (中心位置, 中心気圧)、前線 (左端位置, 長さ) についても新しい知識を作成する。

時刻 t において、新しい知識での台風の位置 ($X'(kttm, t)$, $Y'(kttm, t)$) は

$$X'(kttm, t) = X(ntt, t) + [\min\{X(ntt, t) - X(kttm, ti)\} / 2] \quad (25)$$

$$Y'(kttm, t) = Y(ntt, t) + [\min\{Y(ntt, t) - Y(kttm, ti)\} / 2] \quad (26)$$

となる。ここに、引数内の m は知識内の台風番号、最小化は時間変数 ti に関して行われる。

4.2 ハイエトグラフ、ハイドログラフの合成

距離 DHE , DHD を最小にするズレを De' , Dd' と定義すると、新しい知識は、各時間における平均化により求められる。すなわち、新しいハイエトグラフ $KHE'(m, t)$, ハイドログラフ $KHD'(m, t)$ は、それぞれ以下ようになる。

$$KHE'(m, t) = NHE(t) + (NHE(t) - KHE(m, t - De')) / 2 \quad (27)$$

$$KHD'(m, t) = NHD(t) + (NHD(t) - KHD(m, t - Dd')) / 2 \quad (28)$$

5. 実時間での異常台風判断過程

5.1 異常状況判断の構造

貯水池操作での異常状況判断過程とは、台風情報の異常を認知し、異常状況である場合とない場合の双方で、貯水池管理技術者に対して有用な情報を提供することである。実時間操作において、各時間ごとに知識ベース内のデータと対象台風のデータから類似度を算定する、その類似度が大きい場合には、知識ベース内知識と対象台風とでファジイ推論を行ない、洪水の大きさに対応する危険度を算出し操作の目安とする。類似度が小さい場合には、異常状況と判断し、異常状況下での類似度を提示する (Fig. 4 参照)。

類似度は、知識獲得過程と同様にファジイ理論を用いて算定される。台風の類似度を評価する指標として天気図、台風進路、ハイエトグラフ、ハイドログラフを用いる。知識獲得過程ではデータがすべて出そろったあとに類似度を算定するが、実時間操作である異常状況判断過程では各時間ごとに状況判断が行われる。日本への台風接近を考えると、台風が日本から離れている場合は、天気図と台風進路の類似度が重要になる。降雨が始まった後は、ハイエトグラフの類似度に注目しなければならず、その後貯水池操作に直結するハイドログラフの類似度が操作に利用される。なお、各類似度は前章での手順を踏襲し、引数として時刻表示 (t) を加える。

5.2 各要素の類似度

台風位置の類似度を $ft(t)$ と設定すると、中心気圧の類似度は、 $ftp(t)$ で得られる。ここで、ファジイ積をとって

$$mft(t) = \min\{ft(t), ftp(t)\} \quad (29)$$

が、台風としての類似度となる。高気圧、低気圧、前線についても同様に $mfh(t)$, $mfl(t)$, $mff(t)$ を求める。これより、対象天気図と知識ベース中の天気図との類似度は

$$fwm(t) = \frac{mft(t) + \sum mfh(t) / Nh + \sum mfl(t) / Nl + \sum mff(t) / Nf}{4} \quad (30)$$

で得られる。異常状況判断過程では、各時間ごとに新しいデータが得られるので、その都度、上記の計算を行う。台風の進路に関しては、台風位置の類似度を、 $ftt(t)$ として求めることが出来、ハイエトグラフ、ハイドログラフの類似度は、 $fe(t)$, $fd(t)$ で得られる。

5.3 危険度の算定、異常状況の抽出

各要素の類似度をファジイ積で総合化し、現在の水文・気象状況の類似度とする。すなわち、

$$fg(t) = \min\{fwm(t), ftt(t), fe(t), fd(t)\} \quad (31)$$

ここで、 $fg(t)$ が閾値 $CR(CR: 0 \sim 1)$ より小さければ、異常状況と判定される。異常状況下での危険度の算出手順は、以下ようになる。

まず、知識ベース内台風データの危険度 (貯水池オーバーフロー、氾濫の可能性) を知識ベース内洪水危険度 krg と定義し、ここではハイドログラフのピークの値から決定する。次に、その知識ベース内洪水危険度を用いて、次のように各時間の危険度 $rg(t)$ を求める。

$$rg(t) = \frac{\sum krg \cdot fg(t)}{\sum fg(t)} \quad (32)$$

得られた $rg(t)$ の値に応じて、「ピークカットでの貯留によって洪水制御が可能である」や「ピークカットが達成できず、オーバーフローの可能性がある」などが認識される。

6. 適用と考察

6.1 適用条件

本システムの操作の適用例として、A ダムを対象として取り上げる。貯水池の諸元は、一定量放流形式

を採用し、総貯水容量が $26.28 \times 10^6 \text{m}^3$ 、有効貯水容量が $20.0 \times 10^6 \text{m}^3$ 、計画高水流量が $1,360 \text{m}^3/\text{s}$ 洪水流量は $840 \text{m}^3/\text{s}$ 、予備放流時水位最大流量は $600 \text{m}^3/\text{s}$ である。対象台風として T1 (1972 年 9 月 15 日～16 日)、T2 (1982 年 7 月 31 日～8 月 3 日)、T3 (1994 年 9 月 29 日～30 日)、T4 (1997 年 7 月 25 日～27 日) の 4 ケースを扱う。

A 洪水調節操作では、下流の基準地点水位を注目しつつ、上流に存在する河道堰での放流量にも合わせて行なわなければならない。洪水時の貯水池操作は、原則として、定められたダムの操作規則に基づいて行なわれる。同ダムの洪水調節の方針を、実際の操作規則よりまとめると、次のようになる。

(i) 予備放流

予備放流水位 (EL58.00m) を越えているときに、最大 $600 \text{m}^3/\text{s}$ の放流を行なう。

(ii) 一次調節

流入量が $840 \text{m}^3/\text{s}$ 以上の時、 $840 \text{m}^3/\text{s}$ の放流を行なう。

(iii) 二次調節

流入量が $840 \text{m}^3/\text{s}$ 以上で、かつ、減少し始めた後、下流基準地点の水位が 5.3m を越えた時、 $160 \text{m}^3/\text{s}$ の放流を行なう。

(iv) 洪水調節後の操作

水位が洪水期制限水位 (EL72.00m) を越えている時、最大 $840 \text{m}^3/\text{s}$ の放流を行なう、このように、変則的な一定量放流形式で放流量を決定している。

6.2 台風情報の知識化

本システムでは知識ベース内知識として、台風情報、すなわち、天気図、台風進路、ハイトグラフ、ハイドログラフの情報を格納する。

(i) 天気図情報の知識化

天気図情報が有用とされるのは、降雨が始まる以前においてである。そこで、天気図内台風の位置が北緯 30 度付近の天気図を知識化する。

(ii) 台風進路情報の知識化

台風進路は、一番最初の有用な情報であり、その進路によって降雨量は変化し、操作方法は左右される。従って、台風の緯度が北緯 25 度を越えてから、日本を越え北緯 40 度に達するまでを知識とする。

(iii) ハイトグラフの知識化

降雨情報は流量予測にとって不可欠なものであり、降雨開始から終了までの情報を知識とする。

(iv) ハイドログラフの知識化

操作規則に基づく貯水池操作では、主に流入量によって放流量が決定される。本研究では、それぞれのハイドログラフが一山性であるものとし、ピーク

後の不明な部分に対して減衰関数の推定・補完を行ない、それを知識として知識ベースに格納する。

6.3 知識内洪水危険度の決定と危険領域

知識ベース内台風の危険度 (貯水池オーバーフロー、氾濫の可能性) を知識内洪水危険度と定義し、ハイドログラフのピークの値から算定する。具体的には、ピーク時の流量が $1,360 \text{m}^3/\text{s}$ を越えている時知識内洪水危険度を 1.0、 $840 \text{m}^3/\text{s}$ 以上の時 0.75、 $600 \text{m}^3/\text{s}$ 以上の時 0.50、それ以下を 0.25 とする。実時間操作において、この知識内洪水危険度から求められる危険度が、0.75 よりも大きい場合は危険領域、すなわち、洪水が計画高水流量を越え制御しきれない可能性があると判断される。0.75 以下 0.50 よりも大きい場合は一定量放流形式の洪水調節を行なう必要があると判断され、0.50 以下 0.25 よりも大きい場合は警戒が必要であると判断される。ここでは、流入量のみを採用し、貯水量については考慮していない。

人間の心理からして、今まで経験したことのない状況に対しては過度の恐怖に陥り、それに対して慎重に対応する。人工知能も人間と同様の反応を行なうと考え、知識内洪水危険度を上記の概念に応じて 1 ランク上げる。すなわち、0.75 であったものを 1.0、0.50 であったものは 0.75 に修正して危険度を求めることにする。

6.4 推論結果

初期状況として、知識ベースに T1 の情報を知識として格納する。そこから T2、T3、T4 が順にやってくると想定し、その都度、異常状況判断過程による実時間操作と知識獲得過程による台風通過後操作を行なう。ここで、便宜上 T1 での操作を STEP1、T2 での操作を STEP2、T3 の操作を STEP3 と呼ぶ。

6.4.1 類似度の検証

(i) 天気図の類似度

天気図の類似度では、T1 と T3、T2 と T3、T3 と T4 の組み合わせは天気図内台風のみによって類似度が計算された。これは、双方に共通して高気圧、低気圧、前線が存在しなかったからである。いずれも、台風の位置はそれぞれ近かったのも、中心気圧によって類似度の大きさが決定された。T3、T4 に比べて T1、T2 の台風の中心気圧は低いので、T1 と T3、T2 と T3 で類似度は小さくなり、T3 と T4 で大きくなった。

その他の組合せでは、高気圧、低気圧、前線を含めて、平均的な類似度を求めた。T1 と T2 は前線が共通して存在し、台風の位置、中心気圧、前線の位置、

長さに大きな差がなかったので、比較的大きな類似度となった。T4 は前線が T1、T2 に比べて北にあり長かった。従って、T1 と T4、T2 と T4 の類似度は比較的小さくなった。

(ii) 台風進路の類似度

T1 と T3 の進路は非常に似通っており、類似度は 0.8728 と大きくなった。T2 は台風発生位置が東よりで、南東から進んできたので、北緯 25 度を越えた時点では T1、T3 に比べて東寄りに位置した。その後は T1、T3 に近い進路を取ったので、北緯 25 度付近での距離によって類似度が決定された。

T4 は日本に達する以前は、他の台風と近い進路を取ることで類似度は大きいですが、日本に上陸する寸前で進路を西に取る。その時点で類似度が小さくなる。この台風の進路は特殊であり、日本付近で停滞して進路を東に向け、その後逆行する形で南に向かう。逆行の部分は、今回採用した *MaxMin* の距離演算法では評価できなかった。ただ、T4 のハイトグラフを見ると、迂回している間に強い降雨が起こっていないので、操作に対する影響はなかった。

(iii) ハイトグラフの類似度

T2 のハイトグラフは、大きなピークを 2 個持つ二山性である。従って、T1 と T4 に対する類似度は、2 回目のピークで類似度が決定されたため、0.16 と小さくなった。T3、T4 のハイトグラフは、ピーク時の値が T1、T2 と比べて非常に小さかった。T1 と T3、T2 と T3、T1 と T4 の類似度は、ピーク時の差で決定され小さくなった。T3 と T4 は、形状もピーク値も他と比べて似ているので 0.80 と大きな類似度になった。

(iv) ハイドログラフの類似度

知識獲得過程において、ハイドログラフは一山性を仮定し、流量低減部を減衰関数で補完して類似度を求めた。T3 のハイドログラフは、他と比べピーク値が極端に小さい。T3 と T1、T2 の類似度はピーク値の差から決定され、0.26、0.16 と小さくなっている。T4 のハイドログラフは、ピーク前のある一定期間、流入量が $300\text{m}^3/\text{s}$ から $400\text{m}^3/\text{s}$ の間を振動している。これはハイドログラフを見れば明らかであるが、降雨が原因となる流出流量ではない。上流河道堰で何らかの操作が行なわれた可能性がある。T4 と他のハイドログラフの類似度は、ピーク値の差でなく、ピーク前の一定流量部分が評価されたと考えられる。T1 と T2 は形状、ピーク値が他と比べて似ているので、類似度は大きくなった。

6.4.2 異常状況判断と知識獲得

知識獲得過程での新しい情報と既に入手している情報間の閾値を 0.5、異常状況判断過程での閾値を

0.2 とする。

(i) STEP1

実時間操作における類似度の時系列変化を Fig. 5 に示す。33 時間目からハイトグラフの類似度の値が最小、48 時間目から 0.16 となり異常状況と判断した。これは、知識ベース内知識のハイトグラフが一山性であるのに対し、対象台風は二山性であったからだと思われる。異常状況と判断した時点でのハイドログラフの差は、対象台風の方が大きいことが示されている。従って、知識ベース内知識の知識内洪水危険度を 1 ランク上げて危険度を計算すると、1.0 で危険領域に入った。システムは、この台風は過去の情報を基にした操作規則では対応できないと判断したことになる。しかし、その後のハイドログラフを追ってみると、計画高水流量を越えず、操作規則に従って操作を行ったとしても対応可能であった。つまり、システムは判断を誤ったことになる。この段階では、知識ベース内知識が一つしかなく、知識ベースの貯水池操作に対する習熟度が低かったからである。あるいは、1 ランク上げという手順が過剰すぎたのかもしれない。洪水終了後の知識獲得過程において、STEP1 では類似度が 0.16 となるので閾値を越えず、T2 の台風情報を新しい知識として知識ベースに格納する。知識ベースは失敗したことを学習し、体験を通して知識を得たわけである。

(ii) STEP2

知識ベース内知識は T1 と新たに格納された T2 の情報であり、対象台風として T3 が通過中と想定する。Fig. 6 は解析結果の例として、知識 1 (T1) に対する類似度時系列である。T3 の特徴として、ハイトグラフとハイドログラフが極端に小さい値をとっている。対象台風は知識 2 (T2) に対して、降雨開始後 2 時間で類似度が閾値 0.2 を下回り、知識 1 に対しても 9 時間後に 0.16 となって、異常状況と判断される。そのまま危険度を計算すると、0.75 で危険領域に入ることはなかった。よって、STEP2 では現行の操作規則で対応できると判断される。知識獲得過程の結果によると、知識 1 に対する類似度は 0.16 で、知識 2 は 0.08 である。T3 の台風情報も新しい知識と認識され知識ベースに格納される。

(iii) STEP3

知識ベース内知識として T1 (知識 1) と T2 (知識 2) と T3 (知識 3) が格納されており、対象台風として T4 を想定する。Fig. 7 は知識 3 に対する類似度時系列である。この台風通過中は異常状況と判断されない。知識 2 に対して降雨開始後 5 時間で類似度 0.16 という値をとるが、知識 1 に対して 0.24、知識 3 に対しては 0.54 であり、三つの知識に対する類似度の最大

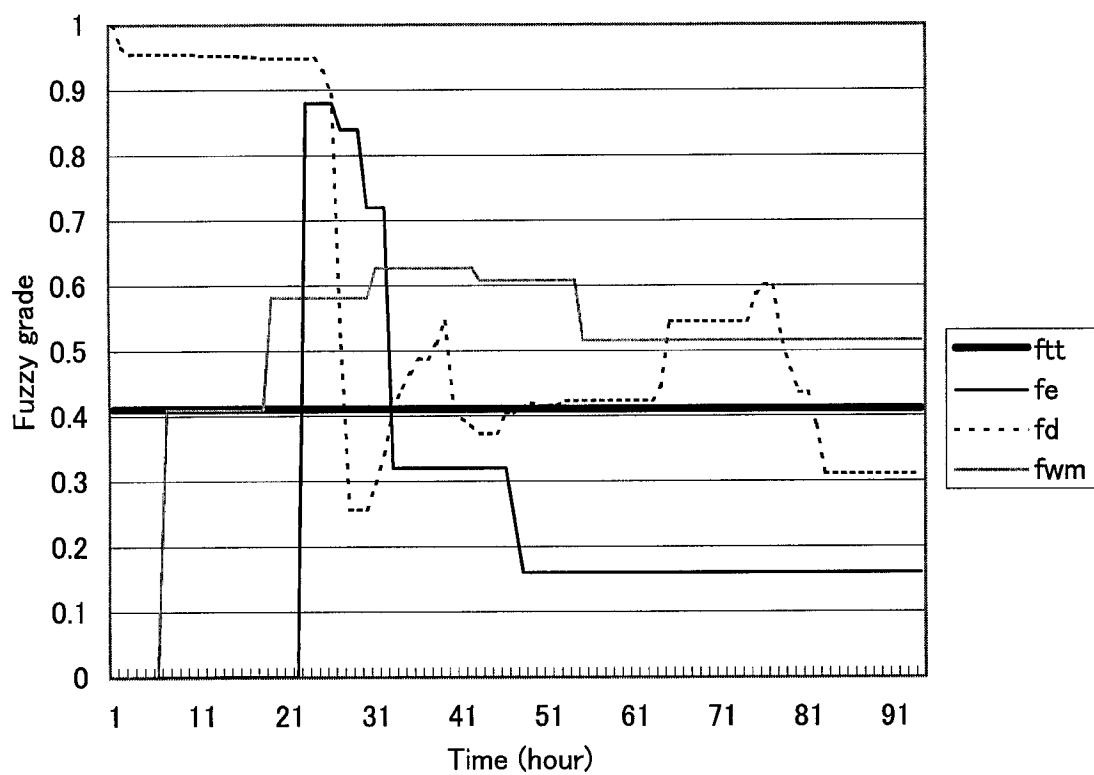


Fig. 5 Time sequences of considered similarities at step 1

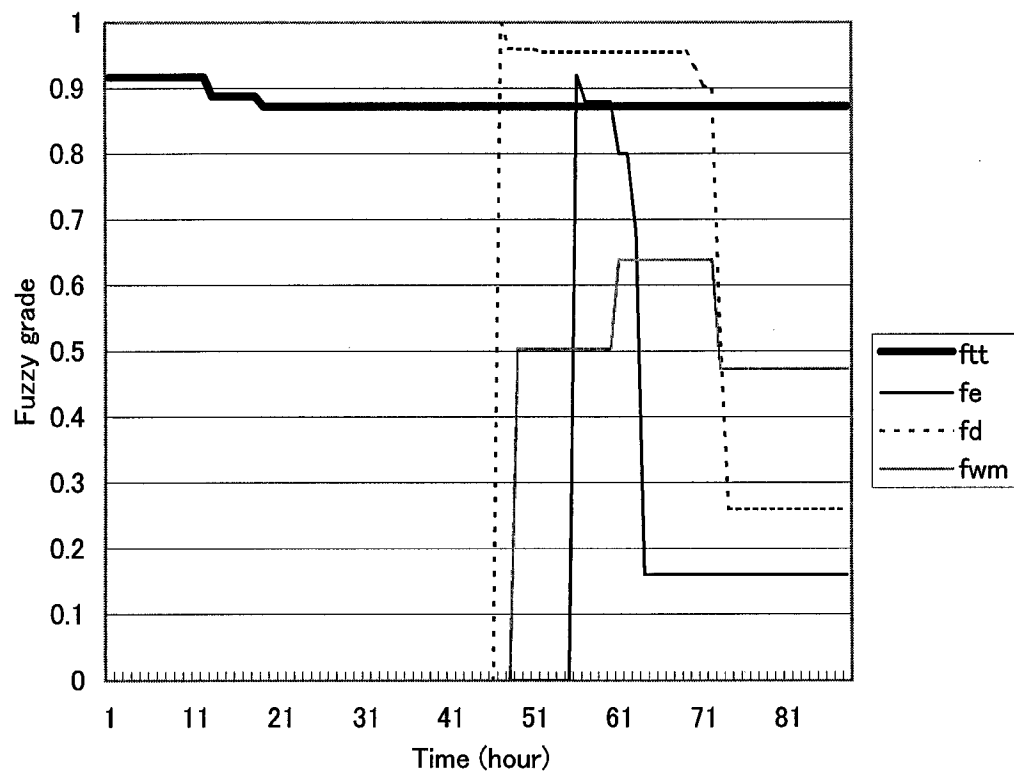


Fig. 6 Time sequences of considered similarities against knowledge data 1 at step 2

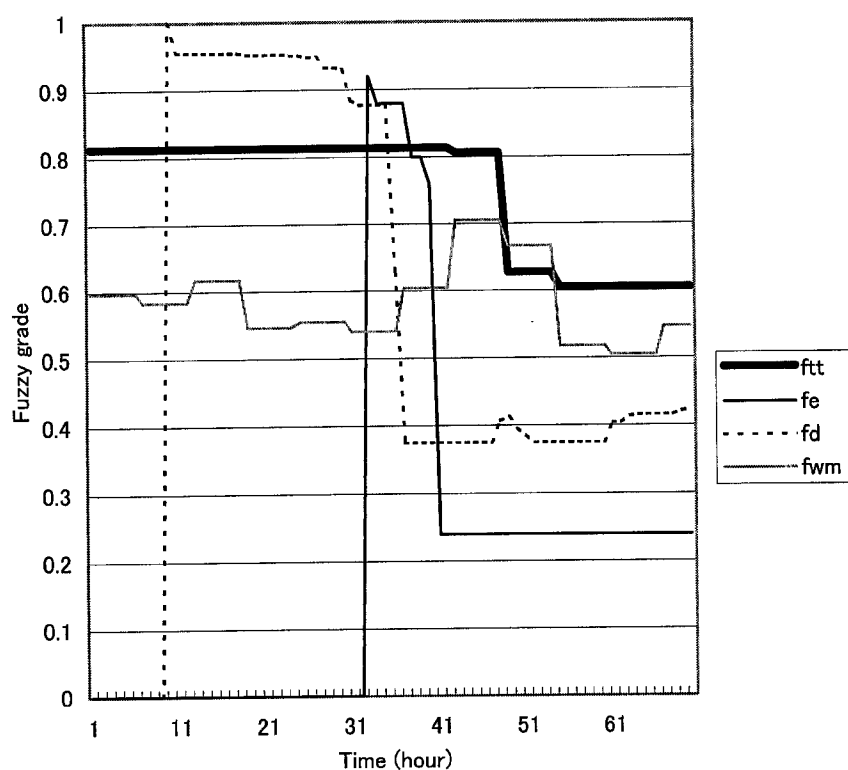


Fig. 7 Time sequences of considered similarities against knowledge data 1 at step 3

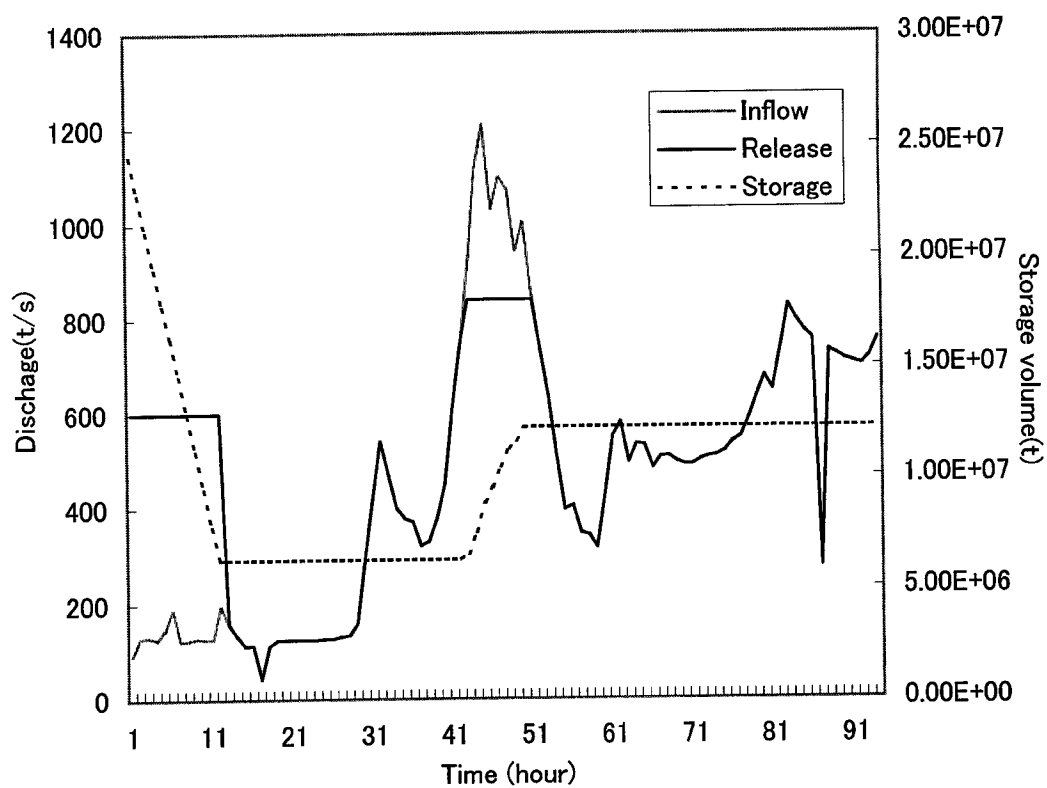


Fig. 8 Controlled results of step 1

値はその後も閾値 0.20 を下回らない。危険度は最初 0.50 以上の洪水調節領域に入るが、58 時間目からは 0.50 を下回り洪水調節を実施することはなかった。知識獲得過程での類似度は、知識 1 に対して 0.24、知識 2 に対しては 0.16、知識 3 に対して 0.48 で、知識 3 に対して類似性がやや高いとみれるが、閾値である 0.5 を越えていないので、T4 もまた新しい知識として知識ベースに格納される。

このように、全 3 ステップを通して、知識ベースは失敗をしながらも知識を増やしていったことが分かる。最初の一知識に比べて、いろいろな状況での対処法を学習したことになる。異常状況に対しても判断の精度が上がったと考えられる。

6.4.3 操作規則に基づく貯水池操作

操作規則に基づいて各 STEP の貯水池操作をシミュレートすると、以下ようになった。

制限水位は 72.0m、予備放流水位は 58.0m であり、初期貯水量を常時満水位のときの貯水量である $26.28 \times 10^6 \text{m}^3$ とした。各 STEP における、流入量、放流量、貯水量の関係は Fig. 8~Fig. 10 に示すとおりである。

STEP1 においては、まず水位を下げるための予備放流を行ない、流入量が $840 \text{m}^3/\text{s}$ を越えた時点で、一定量放流形式である一次調節を行なった。ピーク後、流入量が $840 \text{m}^3/\text{s}$ を下回ると、貯水量は制限水位の時の貯水量である $16.09 \times 10^6 \text{m}^3$ を越えることはないのので、洪水調節後操作に入っていない。STEP2 では、予備放流が終わった後、流入量が $840 \text{m}^3/\text{s}$ を越えることはないのので、一次調節すら行なわれなかった。また、全体的に貯水量も少ないので、洪水調節後操作は行なわれなかった。STEP3 でも、STEP2 と同様に予備放流が終わった後に流入量が $840 \text{m}^3/\text{s}$ を越えることはなく、一次調節、洪水調節後操作は不要であった。

適用に用いた台風は、いずれも洪水規模が小さかったもので、一部一次調節があったものの、洪水調節後の操作は行なわれなかった。より大きな洪水での適用によって、異常状況の判定や、知識獲得の特性が得られるであろう。

7. おわりに

本研究では、知識獲得過程を考慮した貯水池操作支援システムを構築した。知識ベース内知識が一個格納されている状態から、台風が順にやってくる状況を想定して、異常状況判断過程による実時間操作と、知識獲得過程による台風通過後操作を行なった。その際、ファジイ理論を用いて、台風情報の類似性

を評価するために類似度を算出し、操作の目安となる危険度を求めた。また、異常状況判断過程の判断結果から、操作規則に基づいて貯水池操作のシミュレーションを行なった。以上の結果から得られた成果をまとめると、次のようになる。

(i) ファジイ理論をベースに貯水池の実時間操作、台風通過処理という一連の流れを提案し、経験を積むごとに判断の精度が上がるという、自己成長型システムを構築できた。

(ii) 台風情報の類似性を的確に評価し、入力 of 異常状況を判定した。さらに、異常状況に対して、心理的アプローチを導入し、危険度の変更を試みた。

(iii) 台風情報の少ない時から多くなる経過や、危険に対する心理状況など、人間の思考に即した人工知能の定式化を図った。

一方、問題点は次のようになる。

(iv) 異常状況下では、流入量だけを対象として対応法を考えたが、貯水量、下流水位などのオーバーフロー、あるいは、越流を想定する必要がある。

(v) より現実的な操作、また、効率のよい制御効果を達成するため、ハイドログラフの形状を考察した流入量予測が必要となる。

謝辞

本研究の遂行に当たって、貴重な資料と実務から見た適切な助言をいただいた建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所に感謝の意を表します。

参考文献

- 菅野道夫(1988): ファジイ制御, 日刊工業新聞社
荒屋慎二(1992): 人工知能概論, 共立出版株式会社
Kojiri, T., Ikebuchi, S., Unny, T.E. and Panu, U.S.(1990): KNOWLEDGE-BASED SYSTEM APPROACH TO TESERVOIR OPERATIONS, Proc. Water Resources Systems Application, pp.566-574
Kojiri, T. and Sakakima, S. (1993): Decision support system of reservoir operation considering weather forecast and hydrological similarity, Extreme Hydrological Events, IAHS Publ., No.213, pp.429-428
Ito, K., Kojiri, T., Hori, T. and Shimizu, Y. (1996): DECISOPN SUPPORT SYSTEM OF RESERVOIR OPERATION WITH OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING AND MULTI-MEDIA TECHNOLOGIES, Proc. Int. Conf. on Water Resour. & Environ Res., Vol.II, pp.103-110

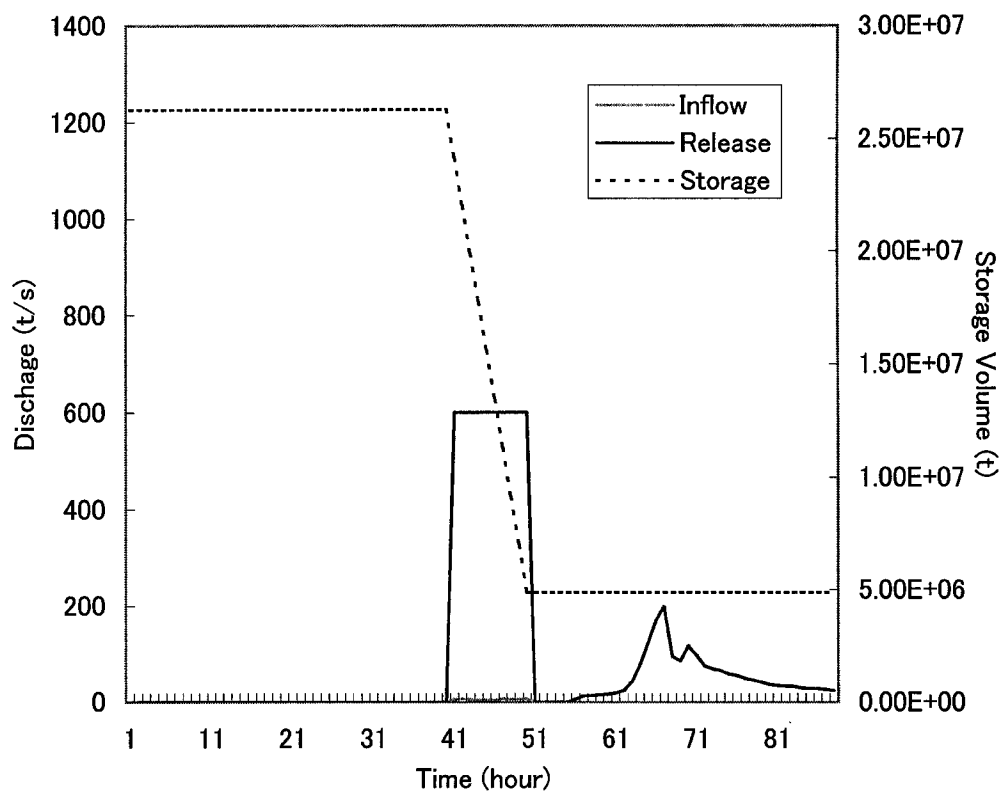


Fig. 9 Controlled results of step 2

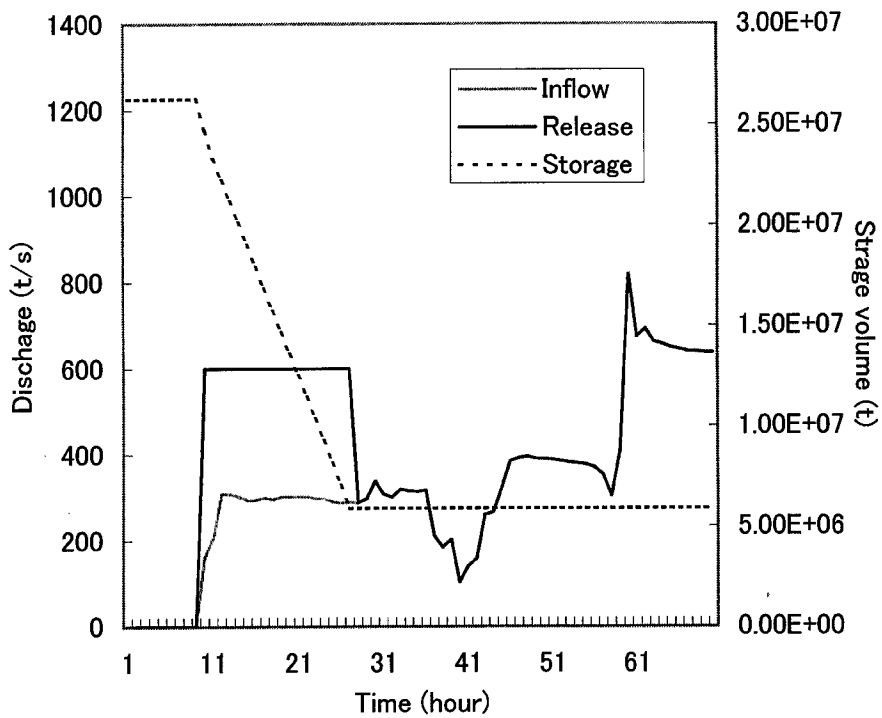


Fig. 10 Controlled results of Step 3

Decision Support System of Storage Reservoir installed with Knowledge Acquisition Process

Toshiharu KOJIRI, Kunio TOMOSUGI and Shintaro HANATANI*

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The decision support system of storage reservoir must make the operation and control easier through its prediction and explanation processes in the urgent case of flood. In this paper, we propose the advanced system installed with knowledge acquisition and knowledge modification process by using artificial intelligent technologies.

Keynotes: Reservoir operation, Decision support, Fuzzy inference and Abnormality of typhoon