

ダム集中制御の為のエキスパートシステムの開発 Development of the Expert System for Centralized Dam Controlling

電源開発建設部 正員 岩下 修 Osamu Iwashita
電源開発建設部 ○西川和也 Kazuya Nishikawa
東北大学工学部 福西 祐 Yu Fukunishi
東京工業大学工学部 学生員 日向博文 Hirofumi Hinata

During a flood, it is very difficult to control a dam properly. In this paper, the authors propose the practical expert system to support centralized dam control using the artificial intelligence which contains a fuzzy inference engine. The system consists of two supporting functions, i.e. one is to make a schedule of dam release and the other to decide a gate opening of next step. Asking veteran dam operators their know-how of dam operation, the structure of knowledge base has been determined. Part of the functions have been tested with the real data concerning the dams on Nahari River in Shikoku-Island. The results of inference approximately coincide the real operations, and are satisfactory.

Keywords ; expert system, fuzzy theory, knowledge base, dam control, Nahari River

1. はじめに

知識工学を応用したエキスパートシステムに関する研究は、近年あらゆる分野で実用化に向けての検討が行われており、これを利用する事により人間の知識をコンピューターにより処理する事が可能となる。ダムの操作に関しても、ダム管理者の持つ知識をデータベースに蓄積し、これを用いて最適なダム操作の方法を推論するダム操作支援用のエキスパートシステムを構築することが可能となろう。出水時にはダム管理者は多種多様な作業を短時間に集中的に処理しなければならない。また、ダム操作には後述するように、多様に変化する気象状況等解析的に求める事の難しい予測や推測を必要とし、これらのうちの多くは長年の経験を有するダム管理者の判断に委ねられているのが現状である。このようなダム管理者の負担を軽減しダム操作の安全性を更に向上させ、また利水上無効放流の少ない最適なダム操作を行なう為には、ゲート制御装置の高度化を進めるとともに、このようなエキスパートシステムの導入の検討を進める事が必要である。

本論文では、日野・福西・日向¹⁾²⁾によるファジー推論のダム操作への応用に関する研究成果を推し進めて、四国・奈半利川水系にある3つの発電用ダムの集中制御所への導入を目指し、実用的なダム操作支援エキスパートシステムの構築に関して検討した結果を紹介する。

2. ダム操作の現状

2-1 ダム操作の難しさ

利水ダムの放流操作は河川法第47条に定められているダム操作規程に順守して行われ、出水時には特にこれを守る為の最大限の努力が払われている。しかし、的確なダム操作を行う為には個々のダム地点がもつ水理特性を考慮した上で、表-1に示すようなさまざまな予測や推定を行いながらダム操作を行わなければならない。これ

表-1 操作上必要な予測・推定

- ・降雨の予測
- ・長期的な流入量の予測
- ・短期的な流入量の予測
- ・波動等を考慮した正確なダム水位の推定
- ・正確なダム流入量の推定
- ・下流水位変化の推定

らのうち流出予測の問題は古くから多くの研究がなされ、近年では比較的精度の高い予測を行うことが可能となってきている。しかし、このほかの予測や推定の内容は、時間をかけて詳細な検討を行えば数式化が可能となるものもあろうが、多くの実際のダム操作においては、ダム操作員の持つ長年の経験に負うところが大きいのが現状である。このような経験により得られる知識やノウハウをシステムに組み込む必要がある。

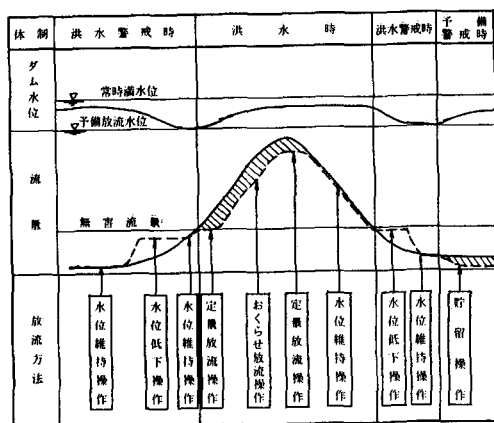
2-2 ダム放流のルール

前述のように利水ダムの操作は、河川法第47条により河川管理者の承認を受けたダム操作規程の内容に従い運用するように定められている。従って利水ダムに、実用的なシステムを導入しようとする場合、まずこの操作規程に示されたダム放流のルールをシステムに組み入れていくべきである。

ダム操作規程には、利水ダムに課せられた義務である「河川の従前の機能の維持」を実施する為の、出水時のダム放流のルール、観測、その他設備の点検整備方法等が定められている。ダム放流のルールは貯水池の規模や河川の状況により違いがある。貯水池の規模が比較的大きなダム（建設省のダム分類でいう1類ダム）の場合は、流入量が無害流量（下流に全く被害を与えない流量）に達する前に、ダム水位を定められた予備放流水位以下まで下げて水位を維持して待機し、流入量が無害流量に達してからは洪水伝播速度の増大を防ぐ意味から一定時間前の流入量に相当する流量を放流し、流入量がピーク流量に達したところで放流量を一定に保っていわゆるピークカットを行い、その後は水位を維持する。また貯水池の規模が比較的小さなダム（2・3類ダム）の場合は、流入量が無害流量に達する前にダム水位を予備放流水位以下に下げ、流入量が無害流量以上である間ダム水位を維持する。

このように、ダムの操作には操作規程に定められた“基本的に守らなければならないルール”があり、状況の変化に従ってその時々に行うべき「放流方法」が図-1に示すようにほとんど一律に決まる。

(1類ダム)



(2・3類ダム)

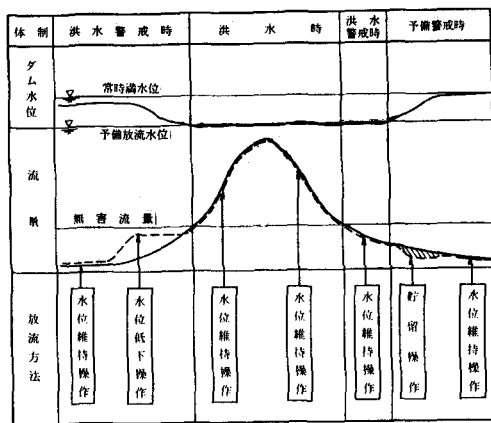


図-1 ダム操作規程に定められる標準的なダム放流のルール³⁾

2-3 ダム操作の業務内容

出水時のダム放流時の業務は表-2に示すように多種多様であり、またこれらは3種類に分類出来る。「情報収集・記録業務」はダム制御装置の高度化により機械化が可能であり、「操作員の手作業」は機械化する事は難しいがそれほど熟練を要する難しい業務ではない。しかし、「操作員の判断による業務」は熟練ダム管理者が前述のように水理特性を見極めて各種の予測や推定を行った上で判断をしなければならない高度な業務である。このなかで流入量の予測には流出解析法等が利用されている例はあるが、その他のものはダム管理者のノウハウに負う所が大きい。以上ダム操作の業務内容から考察すると、支援システムの構成としては流出解析手法を組み込んで判断材料に加え、ダム管理者の判断による業務内容を知識ベースとして構築し、エキスパートシステムによる推論に基づき判断するような形が考えられる。

表-2 ダム放流業務

	内 容
情報収集・記録	- 気象・河川情報の収集 - 上流ダム情報の収集 - 流量水文記録の作成 - 操作記録の作成
操作員の手作業	- 機軸の点検 - 関係機関への通知通報 - 下流パトロール - その他（取水口の除塵等）作業
操作員の判断	- 流入量の予測 - 放流計画の作成 - 操作方法の決定 - ゲートの上げ下げの決定

3. ファジー推論の概要

ダム操作員の持つ経験による知識・ノウハウは、「〇〇測水所の水位が少し上がったから流入量はこれから少し増加するであろう。」等といったあいまいな表現が多く、このような表現をファジー理論（あいまい理論）を用いる事により、エキスパートシステムの知識ベース内に蓄積する事が可能となる。

一般の集合は、属するか否かがはっきり定まっているものの集まりであるのに対して、ファジー集合はその境界がはっきりしないものの集まりである。ファジー集合は、全体集合の要素にその要素がある集合に属する度合（グレード）を”0”から”1”までの任意の値によって表現する。

我々は推論方法としてMamudaniの方法を採用した。この方法について以下で説明する。これは頭切り法とも呼ばれ、ファジー条件文のルールとファクトとの一致する部分の低いほうの高さ（グレード）で結果のメンバーシップ関数の頭を切る方法である。（図-2参照）

いまルールが、 ルール：「X is A and Y is B then Z is C」

のとき、図中の細線で表したA, BそしてCがこれらの関係を表すルールである。

ここで、現在の条件がファクトとして、

ファクト：「X is A₁ and Y is B₁」

と与えられたときのファクトおよび推論結果を図中の太線で表す。

ルールとファクトから推論結果であるC₁を求める方法は、AとA₁の重なる部分のグレードの高さと、BとB₁の重なる部分のグレードの高さを比較し、低い方の高さ（AとA₁の重なる部分）でCの頭を切りC₁の推論結果とする。AとA₁の適合度が高いほどC₁の高さが高くなり、推論結果の信頼度が増す事が分かる。

ここではルールが一つの場合を示したが、他に該当するルールが有る場合はこのような推論をすべてのルールについて行い、最終的な結論はそれぞれの結果を重ね合わせる事により求める。また、最終推論結果の図形の重心位置を求めて結果をよりわかりやすくしている。

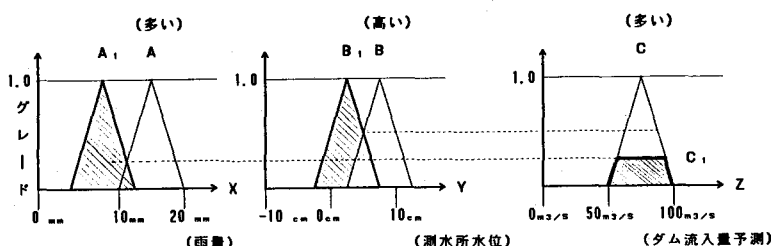


図-2 ファジー推論の方法

上記の説明を具体的な問題に置き換えてみると、簡単な例題として、

ルール：「(雨量観測所の雨量) is (多い) and (測水所の水位変化) is (増加) then (ダム流入量) is (増加する)」

ファクト：「(雨量観測所の雨量) is (7mmくらい) and (測水所の水位変化) is (ほぼ変化無し)」

これは、上記のX, Y, Z, A, B, Cにそのままこのルールとファクトを当てはめてみればよい。ダムへの流入量が多いかという質問に対し、ファクトである雨量観測所の雨量があまり多く無いので、推論結果は信頼度が低くなっている状態を示している。

観測データのようにあいまいさを含まないファクトもあるが、このような場合はファクトとして上記のような三角形分布のものではなく、該当する要素の位置に”1”を当てはめればよい。また、この推論方法はあいまいさを含まない集合に対しても、全く同様に取り扱う行うことが可能で、ルール・ファクトを作る場合にあいまいさを除く、即ちメンバーシップ関数のグレードをすべて”0”か”1”で表現することにより求められる。後に述べる、放流方法を判定する推論にはこれを用いて表現できる。

4. 実用システムの検討

4-1 機能の構成

前述のダム放流業務の分析結果からダム操作を支援すべき機能として考えられるものに「操作員の判断によるもの」があげられた。そしてこれに含まれる業務大きく2つの機能に分けることを考えた。すなわち、今後の放流量の長期的な計画を立てる「放流計画作成機能」、ダム放流中の放流量の増減を求める「ゲート操作支援機能」である。

4-2 放流計画作成支援機能

放流計画を立てる業務は、流入量の予測をして放流予定を立てるものであり、一般的には30分～3時間の間隔で検討される。従って、システムの機能も同様に流入ハイドログラフ上に放流計画を描くものとする。図-3に機能の簡単なフローを示す。まず、流出解析により予測時間分の流入予測をして、その予測値を用い”××操作”、”○○操作”等の「放流方法」の推論を行う。その推論結果から放流量を計算して求め、また放流した結果変化するダム水位を計算により求める。以上の手順を流入量の予測時間分繰り返してハイドログラフに描き出す機能である。流入量の予測には成分分離AR法⁵⁾を利用し、長期的な放流計画を可能とするには予測時間を延長する必要がある降雨の予測値を取り込む等の検討もしていく必要がある。

このように、放流計画作成支援機能は放流前から放流中そして終了まで随時使用されるシステムとなる。

4-3 ゲート操作支援機能

ゲート操作業務は、いま行わなくてはならない「放流方法」に対し、ゲートを上げるべきか下げるべきかの判断を貯水池等のもつ水理特性を考慮しながら行う業務で、5～30分の間隔で行われている。そこで、ゲート操作支援機能としては図-4に示すような3つの部分からなる推論によって放流量の増減を求める機能を考えた。

「放流方法推論部分」は、放流計画作成支援機能の中の放流方法の推論と同じ内容であり、各操作時間において放流方法に変化がないか確認するものである。「流入量増減の推論部分」は流出解析による流入予測とは別に、雨量のみではなく上流ダムの放流量、測水所流量やダムの流入量の増減傾向等の値から推論するものである。また、「放流量増減の推論部分」は上記2つの推論結果をファクトとして取り込みながら、次に行うべき放流量の増減量を推論するものである。

このように、ゲート操作支援機能はダム管理者の経験やノウハウを知識ベースとして蓄積し、ファジー理論による推論を中心とした機能であり、ダム放流中に常に使用されるシステムとなる。

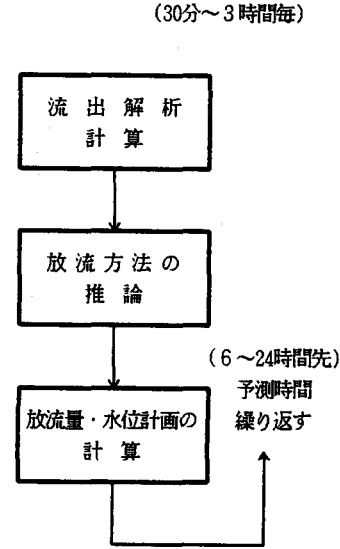


図-3 放流計画作成支援機能

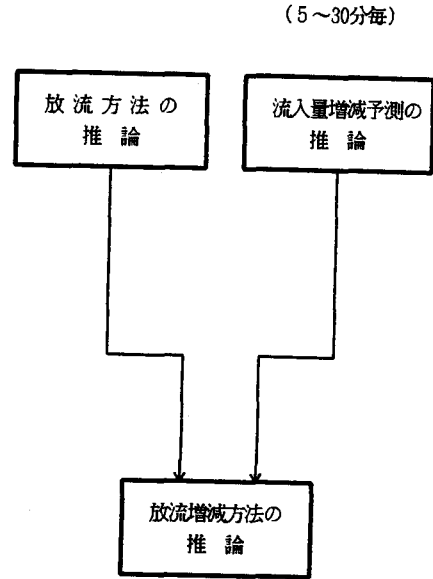


図-4 ゲート操作支援機能

5. 適用地点における検討

5-1 対象流域

エキスパートシステムの検討対象としているダムは四国の奈半利川水系に設置されている3つの発電用ダムである。前述のダム分類方法によれば魚梁瀬（やなせ）ダムが1類ダム、久木（くき）ダムが4類ダム、平鍋ダムが3類ダムであり、2で述べたように操作規程に定められている放流ルールは3ダムともにそれぞれ違いがある。また、ダム相互の影響としては上流ダムの放流量がそれぞれ下流ダムの流入量に影響し、とくに魚梁瀬ダムは他の2つのダムに比べて貯水容量が大きいことから、久木、平鍋ダムの放流計画を考える場合には魚梁瀬ダムの放流計画の影響を大きく受ける。しかし直列配置であることから、ダム相互の影響は流入量の予測値に上流ダムの放流量の影響を加える事で良い。

また、流域内には図-5に示すような雨量、河川水位等の観測設備が配置され、オンラインでダム制御所に伝送される。そしてこれらは支援システムにも取込まれる。

5-2 知識ベース

前述したシステムの機能によれば、知識ベースは大きく分けて以下の3つが必要となる。「操作方法を求める為の知識ベース」はあいまいさをほとんど含まない知識構成となり、一般的なプロダクションルールの形をとる。この理由は、操作方法を求めるルールは主に操作規程に定められた内容の順守に関するルールであり、一義的に定まるものが多いからである。また、「流入量増減予測の為の知識ベース」、「放流量の増減量を求める為の知識ベース」はファジー理論におけるメンバーシップ関数で表現した。この部分は、主に操作員のノウハウを知識として表現した部分で、ファジー理論による表現が適している。「放流量の増減量を求める為の知識ベース」は各放流方法ごとに作成される。

知識ベースの一例として、平鍋ダムの「流入量増減予測の為の知識ベース」の構成を図-6に示す。知識ベースは、平鍋ダム流域の観測施設の配置に合わせ、雨量、河川水位と久木ダム放流量から小川と本流の流量を推論し、これとダム水位の過去の増減傾向から流入量の予測を行う構成とした。

知識ベースは、現地において操作員に対しダム操作知識の聞き取り調査を行う等しながら構築を行ったものである。

ダム名	魚梁瀬	久木	平鍋
流域面積 (km ²)	100.7	104.3	233.4
無害流量 (m ³ /s)	300	300	1,000
設計洪水量 (m ³ /s)	1,400	1,800	2,500

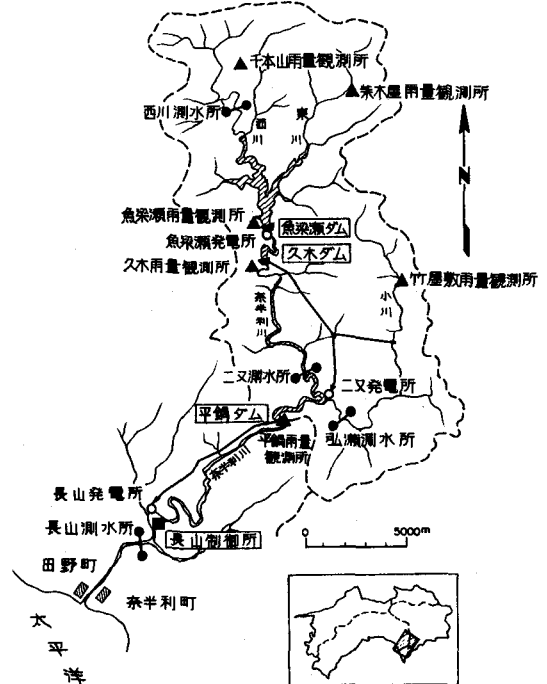


図-5 対象流域

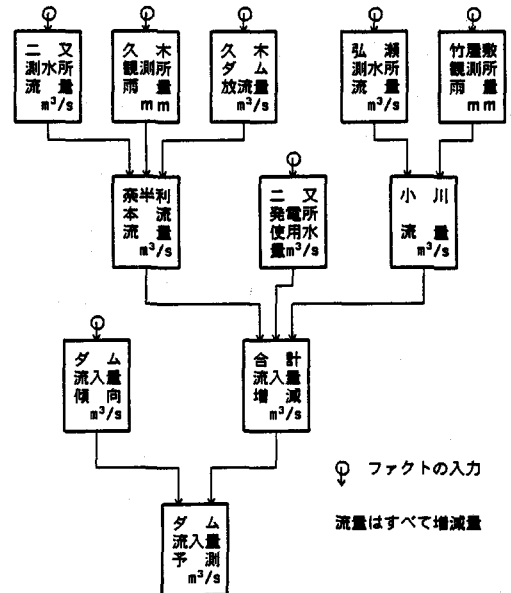


図-6 知識ベース構成の一例（平鍋流入予測）

5-3 推論結果

5-2 の知識ベースを用いて、放流計画作成支援機能の中の「操作方法推論」とゲート操作支援機能の中の「放流量の増減判定」について簡単な例題により検証を行った。まず、図-7は魚梁瀬ダムに関する放流方法を求める為の知識ベースを用いて、図に示すような条件（図の上部）をファクトとして与えたときの計算ステップごとの放流方法の推論結果（図の下部）を示している。判定結果は図-1の1類ダムの標準操作に示される放流方法と一致し、この条件においては妥当な推論を行っている事が分かる。また、図-8は放流量の増減判定の為の知識ベースのうち平鍋ダムの水位維持操作について作成し、実際のダム操作記録を用いて推論結果との比較を行った結果である。推論結果である放流量の増減量はメンバーシップ関数で表している。この推論結果をみると、少し結果に広がりがある場合もあるもののメンバーシップ関数の山の重心位置と実際の操作とがほぼ一致し、また操作員の10分毎の操作の変化に応じた動きをみせており、ほぼ妥当な推論を行っている事が分かる。

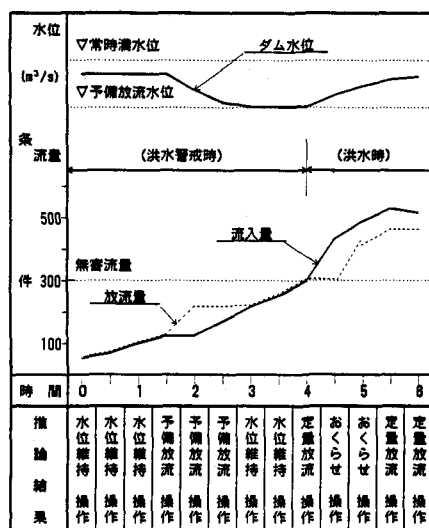


図-7 操作方法判定結果

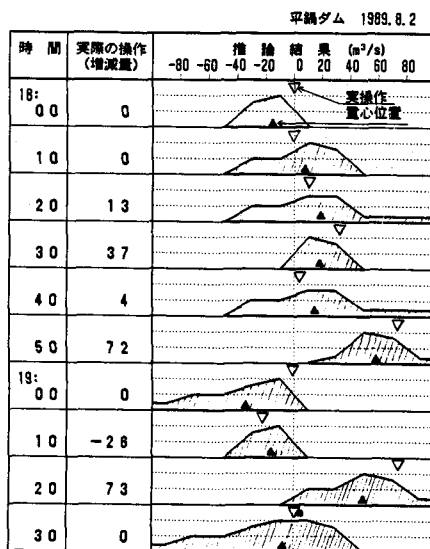


図-8 放流量の増減判定結果

6. 結 び

ファジー推論のダム操作への適用に関する日野・福西・日向¹⁾²⁾の研究成果とダム操作に関する実情の調査結果を基に、ダム操作を支援するための実用的なエキスパートシステムの構成を考案した。次に、システム構築の可能性を確認する為に聞き取り調査に基づく知識ベースの構築を行い、この一部について推論を行ったところほぼ妥当な結果が得られ、システム構築の有用性が確認できた。

今後は、必要であれば機能の見直しを行いながら、観測データをオンラインでファクトに取り込むための検討を行うとともに、検証計算の数を増しながら知識ベースの拡充・充実を進めていき、平成3年度には現地に据えつけてダム制御装置からのオンライン入力下における試験運用を行う予定である。

7. 参考文献

- 1) 日向博文・日野幹雄・福西祐：Fuzzy 推論システムを用いた流出予測、第33回水理講演会論文集、1989
- 2) 日向博文・福西祐・日野幹雄：エキスパートシステムによるダム制御、第44回土木学会年次学術講演会 1989.
- 3) 建設省河川局開発課監修：ダムの管理—例規集—、山海堂、1985
- 4) 田村進一・柳原圭雄・唐沢 博：人工知能の世界、技術評論社、1985
- 5) 日野幹雄・長谷部正彦：水文流出解析、森北出版社、1985.