

# ダム制御操作支援にファジィおよびニューラルネットワークシステムを用いた貯水池操作について

長谷部正彦<sup>1</sup>・長山八州稔<sup>2</sup>・黒崎充能<sup>3</sup>・桑川高德<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 宇都宮大学大学院教授 工学研究科 エネルギー環境科学専攻  
(〒321-8585 宇都宮市石井町2753)

<sup>2</sup>正会員 工修 栃木県庁土木部 佐野土木事務所 (〒327-8503 栃木県佐野市堀米607)

<sup>3</sup>正会員 東京電力株式会社 高瀬川総合制御所 (〒398-0001 長野県大町市大字平)

<sup>4</sup>正会員 工修 宇都宮工業高等学校 (〒320-8558 宇都宮市京町9-25)

著者らは、操作内規の他に熟練指示者の聞き込み調査結果や複数の水文量の情報をファジィおよびニューラルネットワークシステムを用いた操作支援システムに取り込むことにより、貯水池操作を総合して判断できるダム支援制御システムを構築してきた。

本研究では、主としてダム容量に比べて流域面積の比較的小さい多目的ダムに着目し、洪水期と非洪水期間の洪水例にファジィシステムおよびニューラルネットワークシステムを用いた貯水池操作と実際のオペレータによる実操作とを操作内規を基に比較し、本制御システムによる貯水池操作の実用性と有用性について評価・検討を行なった。その結果、洪水期と非洪水期の違いにより、放流量を決定する部分での構造上の違いがあること、つまり、多目的ダムにおいては、利水目的(非洪水期)と治水目的(洪水期)の違いにより操作量を決定する構造同定を変える必要があることが判った。

*Key Words: neural network, fuzzy set theory, dam control system, dam operation, artificial intelligence*

## 1. はじめに

ダムの機能は利水上の観点からの水資源の有効利用や治水的な観点からの災害防止等といった多くの役割を果たしている。さらに、近年、ダム湖水(貯水池)が余暇利用やダム湖畔林計画等の環境にも考慮して利用されている。このような利用目的に対して現在のダム操作ルールでは、観測時点の流入量に対応しただけの簡便なルールを採用しており、オペレータの経験に頼るところが大きいのが現状である。これらの操作は、ダム流入量に基づいて作成された操作内規に厳密に反応するもので、ある規定値を境に二値的に判断を下し、反応もクリスプなものとなっている。そこで、操作内規の他に過去の操作内容のデータや熟練指示者の経験をヒアリング調査し、その調査結果と降水量、流入量及び予測流入量等といった複数の水文量の情報をダム支援操作システムに取り込むことにより、貯水池のゲート操作計画をも含めて総合して判断できる操作支援システムの開発の検討を行う。現在、このような高効率化、省力化が求められる社会のなかでより高度な機能を備え

た操作支援システムの開発はダムの機能向上、資源の有効活用に繋がると考えられる。

## 2. 著者らの従来の研究と既往研究

著者らは、ダムの操作支援システムの開発とその可能性について数年来検討を行なってきた。その結果、例えば、流域面積に比べダム容量の小さい利水ダムで、放流能力が大きくかつ操作方法が流入量の変化に機敏に反応するような場合(3類ダム)には、ファジィシステムで構築された操作支援システムが貯水池操作に有効である<sup>1)・2)・3)・4)</sup>ことが分かった。一方、治水目的のような常時満水位から洪水に対処するダムの操作の場合(4類ダム)には、ファジィシステムとニューラルネットワークを併用して構築した操作支援システムがファジィシステムのみ操作に比べて信頼度が高いという結論が得られた<sup>5)・6)</sup>。

一方、貯水池のダム制御に関しての既往研究は、

表-1 (a) 著者らの従来の研究

著者らの研究内容	利用システム
流域面積に比べ容量の小さい利水ダム <sup>(1)~(4)</sup>	ファジシステム
流域面積に比べ容量の小さい治水ダム <sup>(5), (6)</sup>	ファジー・ニューラルネットワークシステム
流域面積に比べ容量の大きい多目的ダムと流域面積に比べ容量の大きい利水ダム(本研究)	ファジシステム及びニューラルネットワークシステム

表-1 (b) 既往研究

既往の研究	研究内容
小尻・藤井 <sup>(7)</sup>	ファジ貯水池操作
小尻・市川 <sup>(8)</sup>	観測点の少ない地域における流出予測・貯水池操作
池淵・小尻・宮川 <sup>(9)</sup>	気象予報を利用した貯水池の長期実時間操作
日野・日向・福西 <sup>(15)</sup>	エキスパートシステムによるダム制御
高棹・椎葉・堀 <sup>(16)</sup>	ファジエキスパートシステム

表(後に示す)に示すが、特に、本研究と関連する研究としては、小尻らによるファジ制御を用いたダム貯水池操作<sup>7)</sup>、観測点の少ない地域での流出予測・貯水池操作<sup>8)</sup>および気象予報を利用した長期実時間操作<sup>9)</sup>の研究等が挙げられる。表-1(a), (b)に、著者らの従来の研究と本研究との位置付けと既往の研究を示す。

著者らは、これまでは機能が明確なダム(利水型、治水型)の操作支援システムの検討をしてきたが、本研究では、主としてダム容量に比べて流域面積の比較的小さい多目的ダム(Aダム)に着目し、さらにダム容量の大きい利水ダム(Bダム)の一例を加え、洪水期と非洪水期間の洪水例にファジシステムおよびニューラルネットワークシステムを用いた操作支援システムによる貯水池操作を検討する。そして、この制御システムと実際のオペレータによる実操作とを操作内規を基に比較し、貯水池操作の実用性と有用性に関して評価・検討を行なうものである。

### 3. ダム操作支援システムの構成

著者らの既往の研究で構築されたダム操作支援シ

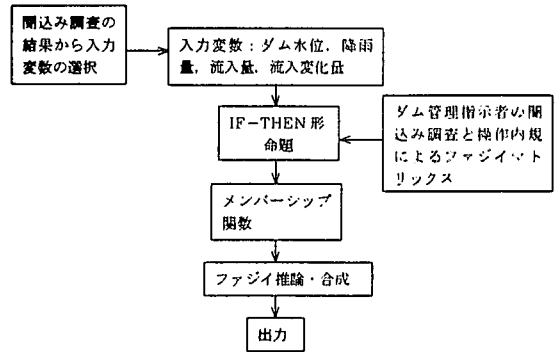


図-1 操作方針部の流れ図(ファジシステム)

システムの構成を簡単に述べる。ダムの操作方式は、操作方針として①ダム水位を下げる(放流)、②水位を上げる(貯水)、③水位を一定に保つ(維持)の3操作が行われる部分と、操作量として①放流量、②貯水量の量を決める部分から構成される。これらの操作は、ダム操作内規の規則と降水量, 流入量, 予測流入量等の複数の水文学量から得られる情報及び聞き込み調査の結果に従って行われる。これらのことを考慮してダム操作の支援制御システムは、操作方針と操作量を決める二つのサブシステムから構成する。本研究では、操作方針部のサブシステムにファジシステムまたはニューラルネットワークシステムを操作量部のサブシステムにファジシステムを適用する。

#### (1) ダム操作方針

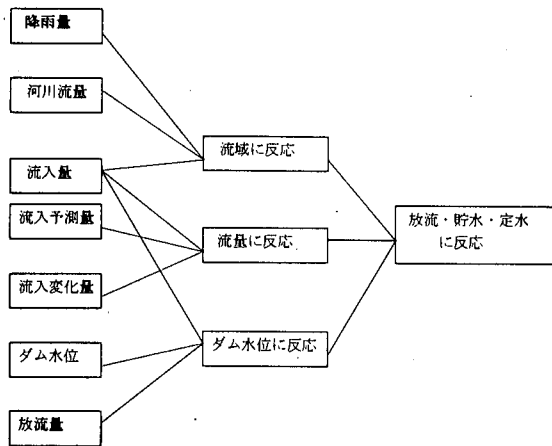
操作方針部に二つのシステムを適用した場合の内容の概要を述べる。

##### a) ファジシステムを用いた場合

ファジシステムを用いた操作方針部では、第一に、入力情報となる降水量, 流入量, 流入予測量および流入変化量等の水文学量の中から聞き込み調査により最適な入力変数を選択する。第二に、ダム操作内規の規則およびダム管理指示者の聞き込み調査の結果に基づいて予めファジマトリクスを作成しておく。第三に、このファジマトリクスと入力変数とからのメンバーシップ関数をファジ推論・合成して、放流, 貯水, 維持のいずれかの結果を出力する。図-1にこのサブシステムの概要を示す。

##### b) ニューラルネットを用いた場合

操作方針部にニューラルネットワークシステムを応用した理由としては、このシステムは記憶や学習そして自己組織化機能を備えているので、必要なダ



入力層 中間層 出力層

図-2 操作方針部(ニューラルネットワーク)

ータを与えることにより、幾つかの選択肢のなかから適切な解を導くことに適しているためである。ダム操作方針の決定のためのサブシステムの構成は3つのパーセプトロン、すなわち、入力層(感覚層)、中間層(連合層)及び出力層(反応層)の3層から構成する。入力層には、降雨量や上流部での支川河川の合算流量、ダム流入量、流入変化量、ダム水位、ダム放流量とフィルタ一分離AR法<sup>10)、11)</sup>(日野・長谷部により提案された手法で数値フィルタにより中間および地下水流出成分に流出分離を行い、各流出成分の応答関数を求め、その応答関数から逆に有効降雨を求め、更に流出予測を行なう流出解析法)による流出予測の結果をダム予測流入量として捉え、これらの七つの水文情報に反応するニューロンが組み込まれている。中間層には、流域の水文特性と流量(流入量)そしてダム状況に反応するニューロンが組み込まれ、出力層には、放流、貯水およびダムの水位維持の決定に反応するニューロンが組み込まれ、これらの三つの層から操作方針のためのサブシステムが構築される。なお、入力層から中間層へのネット結合の組み合わせは、操作内規と聞き込み調査を基に決定した。パーセプトロンでの結合係数の同定には、ネット内部からの出力と外部から与えられる教師データとの比較を基にしたバックプロパゲーション法を用いる。

以上の操作方針部にニューラルネットワークシステムを適用したサブシステムの内容を図-2に示す。

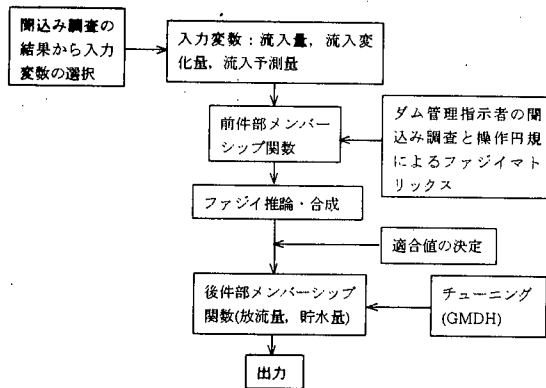


図-3 操作部の流れ図

## (2) ダム操作量

量を決める操作量部のサブシステムは、ファジイまたはニューラルネットワークシステムにより決定された操作方針の出力結果を受けてファジイシステムを用いて操作量(貯水量、放流量)を決める。例えば、操作方針が水位低下放流の場合には、ダム管理指示者の聞き込み調査及び操作内規によりダム流入量とダム流入予測量を前件部変数として選択され、あるいは貯水時の場合には、ダム流入量とダム流入変化量あるいは流入変化量の変わりにダム流入予測量を前件部変数として選択され、これらをメンバーシップ関数にあてはめた後にファジイ推論・合成を行って、その適合値を求める。次に後件部のメンバーシップ関数とその適合値により、該当するファジイ集合ラベルの代表点を重心法により求め、放流量あるいは貯水量を出力する。この操作量部の決定までのフローチャートを図-3に示す。

以上のようにしてダム操作の操作量の決定のためのサブシステムが構築される。

## 4. システムの最適化

ダム操作支援システムの最適化は、操作方針を決めるファジイ部あるいはニューラルネット部と操作量を決めるファジイ部の二つのサブシステムで行われる。ファジイシステムでの最適化に関しては、文献<sup>3)、4)</sup>に詳細に述べてあるので、本論文では省略

する。ここでは、ニューラルネットワークシステムについて述べる。

### (1) 操作方針部

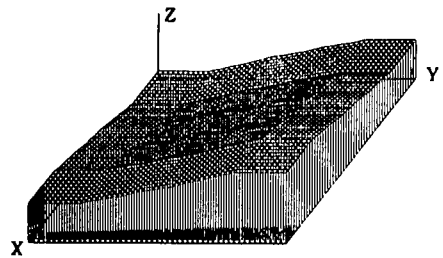
操作方針部のニューラルネットワークシステムは、階層型ネットを用い、出力関数のモデルとして、連続線形モデル（シグモイド関数）を選択する。この時、連続線形モデルのシグモイド関数の傾きをどのように取るのかという出力関数の最適化が必要となる。また、入力層と中間層、中間層と出力層の間に、結合の度合となる荷重値やシナプスを興奮させる最低限の値を示すしきい値を決めるパラメーターの最適化をも行う必要がある。

#### a) ニューラルネットの最適なパラメーターの決定

ダム管理指示者が行う放流と水位維持、貯水の3つの操作方針の判断は現在の気象や河川情報に基づいている。しかし、過去の水文データを分析した結果、意志決定に至るための主な情報は、数値的にある程度の幅（例えば、ある基準値が決められているが、その場の状況に応じた細かな違い）を持っているものと思われる。このためにニューラルネットワークを用いて操作方針を決定する場合、この幅に対応するパラメーターを同定する必要がある。同定は2段階に分けて行うが、第一段階では、入力層に操作方針の決定要因として比較的に重要と思われるダム流入量、ダム流入変化量、ダム水位の3つを取り上げ、3層パーセプトロンを作成する。次に、このデータが持つ数値的な幅を操作内規や管理指示者が行った過去のダム操作のデータを基に設定する。そして、その数値的な幅を持った設定値を満足するように試行を行い各情報の持つ荷重値としきい値を決定する。第二段階では、入力層に操作方針の決定要因である降雨量、上流河川流量、ダム流入予測量、ダム放流量の情報を取り込み、操作幅の設定値を基に試行を行い、荷重としきい値の同定を行う。ニューロンの配置とニューラルネットの構成は前出の操作方針部に示したが、これはダム管理指示者に操作方針を決める時に考えられる意志決定の過程をヒアリング調査した結果に基づいて構築されたものである。

#### b) 出力関数

出力関数であるが、ニューラルネット理論により決定される対象が、ダム操作の方針を示す放流、水位維持、貯水の3つの中から適切な解を求める3者択一の単純な計算であるために中間層と出力層の持つ出力関数としては、シグモイド関数を用いた連続しきい値モデルを用いる。



論理積—論理和 (MIN-MAX)

図-4 ファジイ曲面

### (2) 操作量部

ダム操作量を決めるファジイシステムでは、前後部メンバーシップ関数の構造と最適なパラメーターの決定そして最適な推論法を決定する。

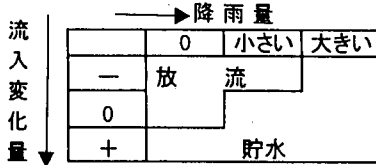
#### a) ファジイ推論法

ファジイ推論はその統合法や一点化法等の手法の違いにより、幾つかの推論法<sup>1,2), 1,3)</sup>が存在するが、その内の最適な推論法を検討する。

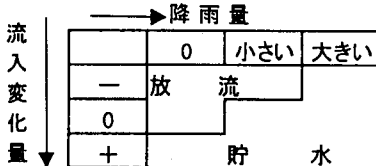
ダム操作制御との適合性を、X、Y軸が入力値でZ軸は出力値である2入力1出力のファジイ曲面を示す3次元グラフィックスにより表現する。この曲面は入力側の前件部変数が持つファジイ集合幅を分割し、3つのラベルに分けた構造で、パラメーターは、各々が占めるラベル幅を等しく取るようにし、また出力側の後件部も同様にファジイ集合幅を分割し、5つのラベルに分割した構造と各ラベル幅を等しく取るようなパラメーターを設定する。そしてメンバーシップ関数上で各推論法ごとに、先に分割したファジイ集合幅の値を順次代入して試行を行う。その結果、ファジイ推論による入出力関係の判断を示す曲面として表す（この曲面を著者らはファジイ曲面と呼ぶ）。人間の入出力関係の判断がこのファジイ曲面で正確に判断できるとは限らないが、ダム制御により広い量的判断を持たせることを考慮すれば、①入力平面上で原点と原点の対角点の出力値の差が大きいこと、より緩やかな反応を示すことを考慮すれば、②出力値をプロットした曲面が滑らかに推移すること、が妥当な判断基準と思われる。これらの二つの判断基準は、ダム操作のような量的変化の反応が緩やかで、かつ、幅の広い出力が要求される制御に適しているものと考えられる。こうした基準をもとに、種々の推論法によるファジイ曲面を計算して検討した結果<sup>3)</sup>から、直接法と呼ばれるもののうちの統合法では、論理積—論理和 (Min-Max) の推論法のタイプが、良いことがわかった<sup>4)</sup>。図-4に

ダム水位が中位の場合

1) ダム流入量が多い場合



2) ダム流入量が中位の場合



3) ダム流入量が少ない場合

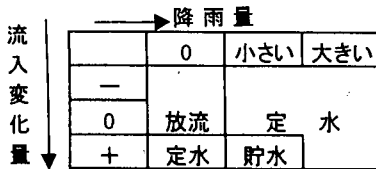


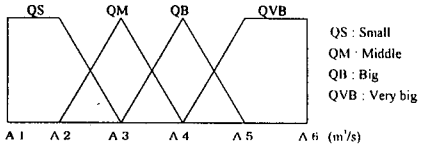
図-5 ファジイマトリクス

Min-Maxの推論法のパジイ曲面を示す。また、代表点を決める一点化法では重心法がダム操作制御には適していることも分かった<sup>6)</sup>。

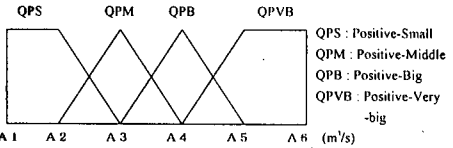
b) ファジイモデリング

ファジイモデリングは、①入力変数（前件部変数）と出力変数（後件部変数）の持つファジイ集合をいくつかの集合ラベルに分ける構造同定、②各ラベルの持つ集合幅を決めるためのパラメーター同定からなる。このサブシステムでは、入力変数となるダム流入量とフィルタ分離AR法により1ステップ予測（1時間）された流入予測量を前件部変数として、規模別に前件部の集合ラベルを作成する。同様に出力変数となる貯水量と水位低下放流の放流量を後件部変数として、規模別に後件部の集合ラベルをも作成する。前後件部のファジイ集合ラベルのつながりを本解析の1例として、ダム水位が中位の場合の2次元のファジイ部分空間に分割（ここにおける分割はあいまいさを含む形で表現されているものである）したファジイマトリクスを図-5に示す。次に、具体的手順を述べると、ファジイ空間に分割された2次元マトリクスにより操作量を決定するファジイ命題を決める。このとき、ファジイ集合を各ラベルに分ける際に、人間の思考や判断のパター

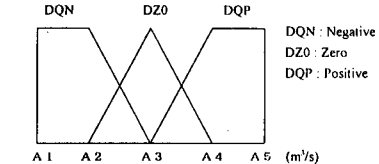
流入量のメンバーシップ関数



流入予測量のメンバーシップ関数



流入変化量のメンバーシップ関数



放流量（後件部）のメンバーシップ関数

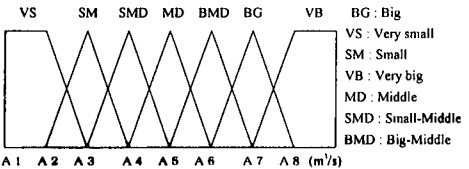


図-6 メンバーシップ関数の構造

とダム管理指示者のヒアリング調査を基にラベルを作成して決定する。さらに各ラベルの持つ集合幅は、前件部のダム流入量と流入予測量と後件部の貯水、放流と水位低下放流のファジイ集合幅を、過去の水文量や操作のデータをもとに予め決定した。また、メンバーシップ関数のパラメーターについても等間隔に与えることを前提とし、操作内規にある数値をもとにGMDH法(Group Method of Data Handling)<sup>14)</sup>を用いてパラメーターの同定を行った。ここに、GMDH法を用いたのは、最適な変数の組み合わせが自動的に選択される点にあるためである。その結果、図-6のような前・後件部のメンバーシップ関数の構造が決定された。このような手順によりダム操作量部のサブシステムが決定される。

5. 操作支援システムの実ダムへの応用

(1) ダム操作の評価基準の設定

この解析に用いた資料のAダム（形式：重力式コンクリートダム）は、流域面積24.8 km<sup>2</sup>、洪水調節量3,500千m<sup>3</sup>の多目的ダムであり、調節流量254 m<sup>3</sup>/s、流下流量36 m<sup>3</sup>/sである。

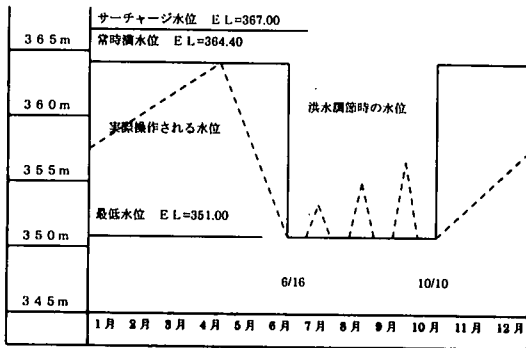


図-7 Aダムの年間の水位図

また、このダムの操作内規の規則は第27条から構成されている。このダムの年間を通じての水位の概要を図-7に示す。

著者らの現在までの研究においては使用目的が明解に区分されたダムについて検討されてきたが、本報告では、主として流域面積に比べてダム容量の大きい多目的ダムの洪水期間（6月16日から10月10日）と非洪水期間（10月11日から翌年6月15日）の洪水資料5例と洪水調節量が大きく利水目的のBダムの非洪水期の洪水資料の1例を加えて、ファジシステムまたはニューラル・ファジシステムによる操作支援システムとオペレータによる実操作とを操作内規に照らし合わせながら比較し、貯水池操作の実用性と有用性について評価・検討を行なう。なお、本制御システムの同定を行うに当たって従来の研究<sup>5)</sup>・<sup>6)</sup>では、「貯水池を有効に活用することを含めて、貯水量を出来るだけ確保する」というシミュレーションの評価基準をも含めていたが、本研究では、ヒヤリング調査の結果、Aダムにおいては現在の操作内規を満たすものが、最も適していると考え、かつ前出のファジ曲面の滑らかさをも考慮して以下の3つの評価基準とした。

- ① ピーク前後の流入量に対応した放流量とピーク放流時間をピーク流入時間に比べ遅延する。
- ② 時間的放流変化量を極力おさえ、滑らかな放流曲線を描くようにする。
- ③ 操作内規を満足する。

## (2) 解析結果と評価・検討

### a) 洪水期の洪水例の解析

洪水期の解析例は、No. 1（平成3年9月18日）、No. 2（平成6年6月27日）およびNo. 3（平成8年9月22日）の3洪水である。各洪水に対して解析に用いたニューラル・ファジシステ

表-2 メンバシップ関数の分割値(N-Fシステム)

操作量部

#### (1) 水位低下放流時

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
ダム流入量	0	5	10	15	20	25	...	...
流入予測量	0	5	10	15	20	25	...	...
放流量	0	1	2	3	5	3	9	11

#### (2) 予備放流時

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
ダム流入量	0	5	10	15	20	25	...	...
流入予測量	0	5	10	15	20	25	...	...
放流量	0	1	2	3	5	3	9	11

#### (3) 貯水時

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
ダム流入量	0	5	16	22	32	...	...	...
流入予測量	0	5	10	15	24	38	...	...
放流量	0	2	6	9	16	23	30	40

表-3 ニューラルネットワークの荷重値としきい値(洪水期)

流域に反応するニューロン	荷重値	しきい値
累計降雨量	0.8	38
河川流量	0.1	
ダム流入量	1.0	
流量に反応するニューロン		
ダム流入量	0.3	2.1
流入予測量	0.3	
流入変化量	1.0	
ダム状況に反応するニューロン		
ダム流入量	0.1	360
ダム水位	0.1	
放流量	0.2	
放流に反応するニューロン		
流域に反応	0.2	2
流量に反応	0.3	
ダム状況に反応	1.0	
貯水に反応するニューロン		
流域に反応	1.0	2
流量に反応	0.6	
ダム状況に反応	0.7	
水位維持に反応するニューロン		
流域に反応	0.2	2
流量に反応	0.5	
ダム状況に反応	0.8	

ムのメンバシップ関数の構造(図-6)の分割値を表-2、ニューラルネットワークの荷重値としきい値を表-3に示す。なお、表-1、2に示す数値は、洪水No. 1~No. 3とも同じである。

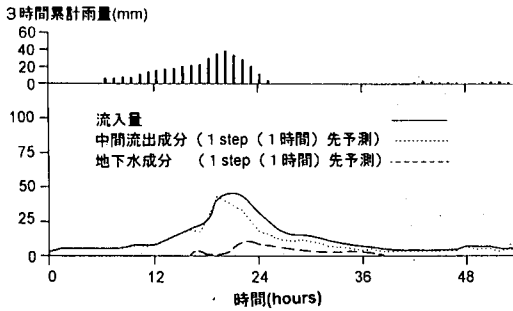


図-8 ファジシステムによる操作結果

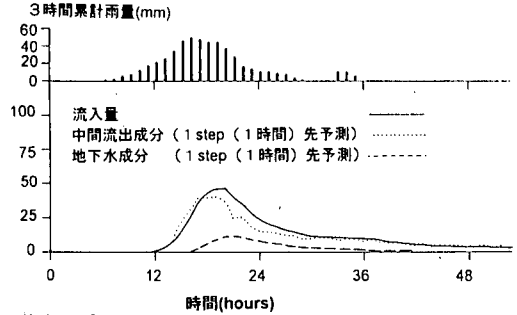


図-10 Fシステムによる操作結果

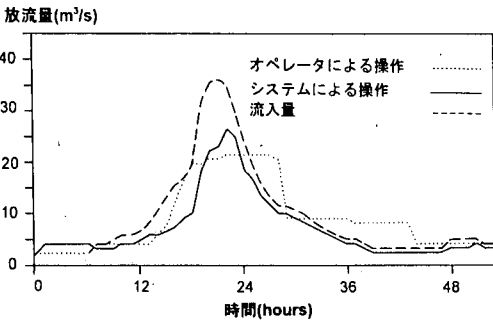


図-9 ファジ・ネットワークシステムによる操作結果

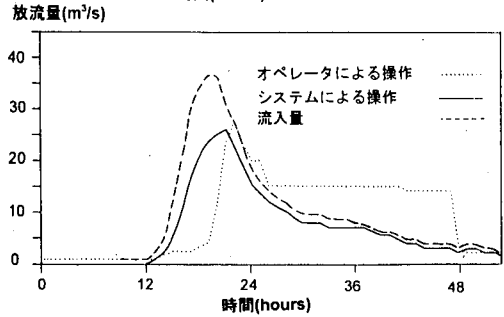


図-11 N-Fシステムによる操作結果

1) No. 1の洪水例

No. 1の洪水の支援システムによる操作結果とオペレーターによる実操作の結果との比較をファジシステム（以下Fシステム）の場合を図-8、ニューラル・ファジシステム（N-Fシステム）の場合を図-9に示す。図中のダム予測流入量は、フィルタ分離AR法により1時間予測した流入量で、

中間流出成分流量と地下水流出成分流量とに分離して示してあるが、流入予測量としてはこれらの2成分を合計したものをを用いている。また図において、破線がダム流入量、実線がダム操作支援システムによる操作結果、（以下、シミュレーターと呼ぶ）そして点線がオペレータによる放流曲線である。オペレーターによる放流曲線が特異な曲線を示している

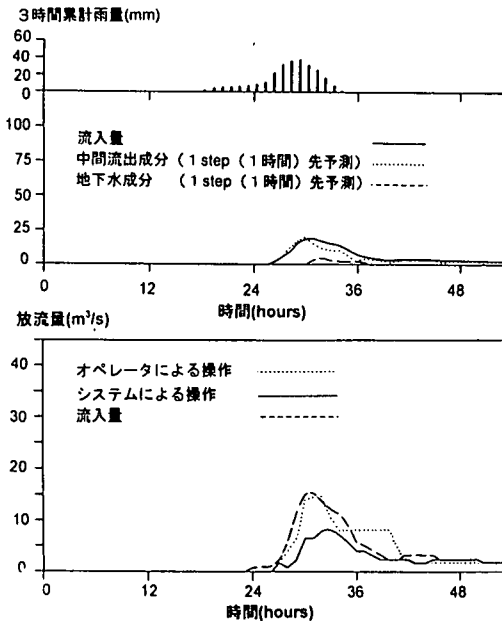


図-12 Fシステムによる操作結果

のは、ダム堤体中央に設けられた主ゲートがシミュレーターでは開度調節式であることを前提に行っているのに対し、オペレータによる実操作はゲート開度が0かある規定値の2値操作を行っているためである。図から、両システムともAダムの計画最大放流量  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  以内をみたとおり、ピーク放流量に関しては、N-Fシステムの方が多く放流して実操作に近い。また、ピーク流入量を過ぎた後の放流操作では、貯水量（総流入量から総放流量を差し引いた量）（後に示す表-6）が実際の貯水量とほぼ同じ量になるような操作に、より近づける結果となっている。

### 2) No. 2の洪水例

FシステムおよびN-Fシステムと実操作の操作結果を図-10, 11に示す。両システムともにピーク放流量は、ほぼ同量で、かつ計画最大放流量以下である。FシステムとN-Fシステムの違いは、Fシステムでは、全ての操作が貯水操作であるが、N-Fシステムでは、流入量のピーク後に貯水操作から放流操作に変わっているところである。また、N-Fシステムでの貯水量は、実操作のそれとほぼ同量である。この解析例においても前例のようにFシステムでは利水上、N-Fシステムでは、治水上に有利である。

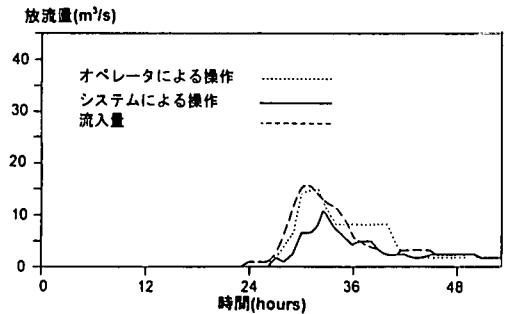


図-13 N-Fシステムによる操作結果

### 3) No. 3の洪水例

この洪水は前出の洪水に比べて、規模の小さい洪水例である。解析結果を図-12, 13に示す。ピーク放流量がN-Fシステムのほうがやや大きい。

洪水規模の小さいにもかかわらず、No. 1やNo. 2の結果と量的には小さいが同様な操作傾向を示している。

### b) 非洪水期の洪水例の解析

非洪水期の洪水例は、No. 4（平成5年11月14日）とNo. 5（平成7年3月31日）の2洪水とBダムの利水目的のNo. 6（昭和63年6月2日）の洪水である。各洪水に対してのFシステムのメンバーシップ関数の分割値を表-4、荷重値およびしきい値を表-5に示す（ただし、No. 6のメンバーシップ関数の構造の分割値をここでは省略する）。

#### 1) No. 4の洪水例

No. 4の洪水は、非洪水期では比較的規模の大きい洪水である。この洪水の実操作とシミュレート結果（今までの結果から利水上有利とされるFシステムの場合を示す）の比較を図-14に示す。図からFシステムで用いた構造のパラメータが洪水期と同じ構造としたために、貯水量が非常に小さい量（表-4）となり、利水を主目的としている時期の操作としては、相応しくない操作と考えられる。また、実際のオペレータの放流操作に着目すると、殆ど放流をしていない。前出の図-7の水位図からも分かるように洪水期から非洪水期に移る時期には水位を常時満水位まで上昇させるために降雨があっても放流せずに、ダムに水を貯めるという操作が必要になってくるためであると思われる。このことを考慮して、貯水時の構造同定を変えて解析した。先づ始



表-4 メンバシップ関数の分割値(Fシステム)

操作方針部

L.W.L=3570cm, H.W.L=3590cm

	A1	A2	A3
ダム流入量	0	20	40
累計雨量	5	15	25
流入変化量	10	0	10
ダム水位	3560	3575	3595

操作量部

(1) 水位低下放流時

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
ダム流入量	0	5	10	15	20	25	-	-
流入予測量	0	5	10	15	20	25	-	-
放流量	0	2	4	6	8	10	12	14

(2) 予備放流時

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
ダム流入量	0	5	10	15	20	25	-	-
流入予測量	0	5	10	15	20	25	-	-
放流量	0	2	4	6	8	10	12	14

(3) 貯水時

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
流入予測量(後)	0	10	20	30	40	50	-	-
流入変化量(前)	10	5	0	5	10	15	-	-
ダム流入量	0	7	14	21	28	35	-	-
放流量	0	2	8	16	20	24	28	32

めに、従来、放流を遅延させるための流入変化量を3時間単位から1時間単位にするなど試行錯誤を行なったが、どうしても放流量の操作結果(シミュレート結果)が流入量に沿った山なりになって、実際のオペレータの操作に近づけることが出来なかった。そこで、次に貯水時の構造において、操作量部の決定のシステムへの入力である流入変化量の変わりに流入予測量を用いて解析を行なった(表-4には、貯水時構造において前は流入変化量、後は流入変化量の代わりの流入予測量を示している)。この理由としては、流入変化量には負の値をもち、それにシステムが応答するために良い操作結果が得られなかったと考えられる。このことは、利水を主目的とした場合には放流操作は、非洪水時期間でも相当規模の大きい洪水(常時満水位を超える場合)の場合での洪水調節(操作内規)以外には、行なわれず主に貯水操作が行われるということを考慮すればよい。その操作結果を図-15に示す。ここには、N-Fシステムの操作結果を利水目的ということを考えて省略したが、両システムの貯水量とピーク放流量を表-6に示してある。図から、より実際の操作に近い値となり、貯水量はFシステムにおいては実操作よりやや大きい量となり、利水上有利であると

表-5 ニューラルネットワークの荷重値としきい値(非洪水期)

流域に反応するニューロン	荷重値	しきい値
累計降雨量	0.8	38
河川流量	0.1	
ダム流入量	1.0	
流量に反応するニューロン		1.9
ダム流入量	0.3	
流入予測量	0.2	
流入変化量	1.0	
ダム状況に反応するニューロン		358
ダム流入量	0.1	
ダム水位	0.1	
放流量	0.2	
放流に反応するニューロン		2
流域に反応	2.0	
流量に反応	1.0	
ダム状況に反応	1.2	
貯水に反応するニューロン		2.2
流域に反応	1.0	
流量に反応	1.0	
ダム状況に反応	1.0	
水位維持に反応するニューロン		1.6
流域に反応	1.0	
流量に反応	0.5	
ダム状況に反応	0.8	

思われる。

2) No. 5の洪水例

この解析例は、融雪の終わりの時期の洪水である。このダム操作においてもNo. 4の洪水例と同じように流入変化量の変わりに流入予測量を用いた時の貯水時の構造としている。Fシステムによる操作結果を図-16、N-Fシステムによる場合を図-17に示す。ピーク流入量がNo. 4に比べて1/3程度しかないために、操作結果は、両システムの間にはあまり差が生じない。しかし、貯水量の観点からみれば、Fシステムのほうが有利であることが分かる。表-6にピーク放流量、ピーク流入量および貯水量を示す。

3) No. 6の洪水例

このBダムは、ダム容量が大きい利水ダム<sup>3)</sup>であり、本解析例は非洪水期の洪水資料で二山型のピーク流量をもつ洪水No. 6(昭和63年6月2日)の例である。本報告には利水ということを考慮して、Fシステムによる解析結果を示してある。なお、操作方針部と操作量部でのFシステムにおける構造の考え方は、No. 4, 5と同じである。支援操作システムによる操作結果と実操作によるそれとの水位図の比較を図-18に示す。この水位図の結果から、始めの水位低下放流においては、両者ともほぼ同じようである。続いての操作である水位低下時定

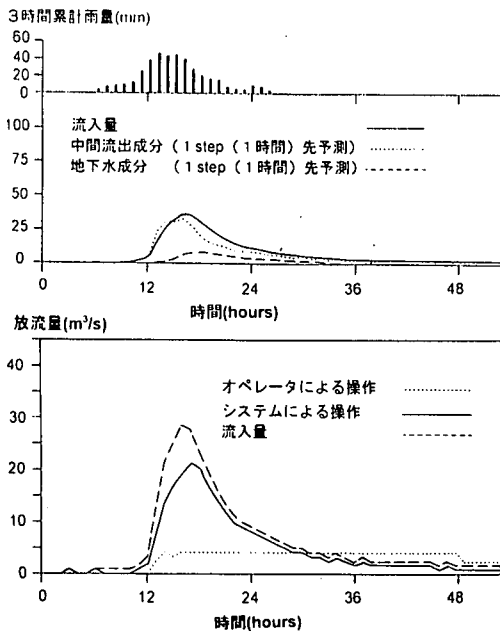


図-14 Fシステムによる操作結果

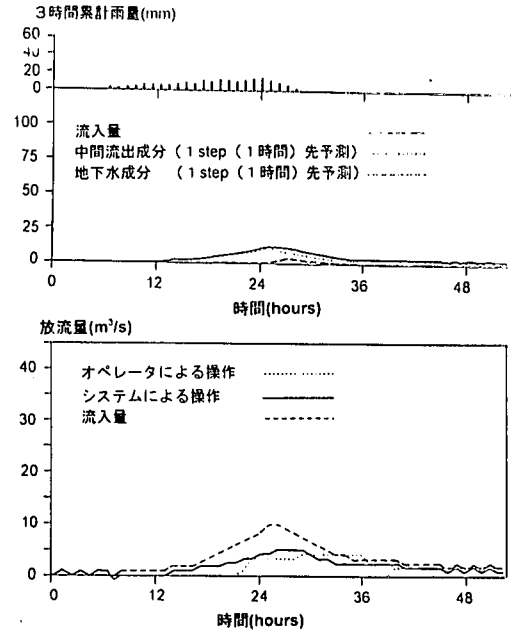


図-16 Fシステムによる操作結果

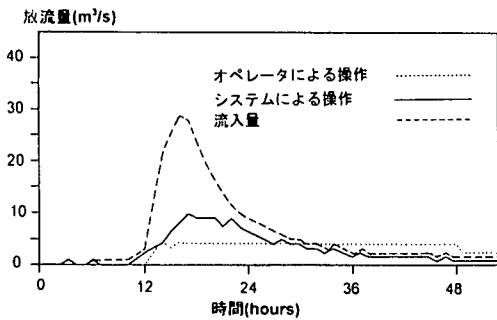


図-15 修正Fシステムによる操作結果

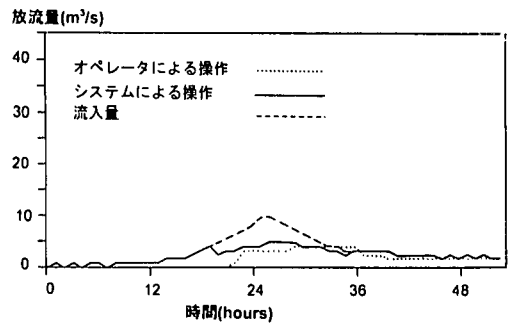


図-17 N-Fシステムによる操作結果

水開始時期もほぼ同時期であり、この時の水位に関してもオペレータでは490cmであり、本制御システムでは450cm程度でやや多めに放流しているがオペレータの操作に近いものとなっている。二山目のピーク時には、貯水開始時期が実操作時間より約1時間程度早い、その後貯水を行なったのち、定水状態に入り、その後の放流を防ぐことにより水位の極端な変動が抑えられている。二山目のピーク後の貯水では貯水速度は、両者はほぼ同じであり、洪水時満水位への到達時間もほぼ同時期である。

以上、6洪水の例について解析を行なったが、何れの解析例においても前出の3つの評価基準に基づ

いてダム操作が行なわれていることがわかる。

### c) FシステムとN-Fシステムとの比較

FシステムとN-Fシステムのシステムの構造上の違いがダム操作に与える影響を比較する。ダム操作の操作方針部は、3者択一式なので、Fシステムでは、予め作成されたアルゴリズムを基にファジィ確率を求め、3者の中で最も高い確率値が出力するという流れで決定されるが、N-Fシステムの場合には3層型のニューロンの配置とニューラルネットの構成を行ったものに、しきい値や荷重値を付加することで最も高い刺激を受けたニューロンが出力され決定される。この両制御システムの違いにより、

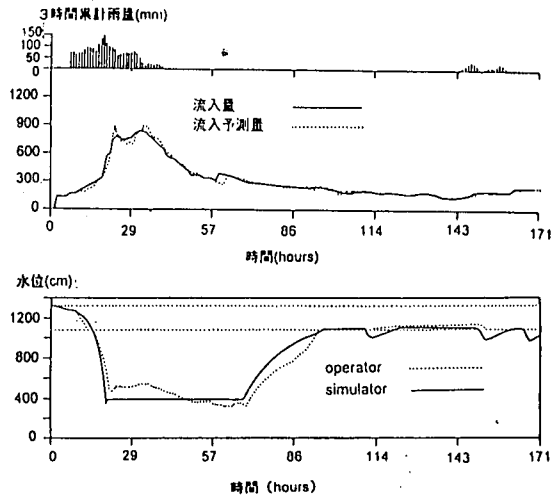
表一六 ピーク放流量と貯水量

洪水システム	ピーク放流量 (m <sup>3</sup> /s)		貯水量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	
	支援操作システム	支援操作システム	実操作	
No. 1	(F)	26	68.70	5.04
	(N-F)	30	28.08	
No. 2	(F)	25	64.80	1.08
	(N-F)	26	1.44	
No. 3	(F)	8	27.30	4.32
	(N-F)	12	22.36	
No. 4	(F)	21	41.40	69.48
	(修正 F)	10	78.12	
	(N-F)	12	52.92	
No. 5	(F)	5	40.32	36.00
	(N-F)	6	19.08	

治水目的のダム操作のように時々刻々の流入量の変化が大きい場合に、Fシステムを用いると、アルゴリズムが無限に作成されていないという問題点がある。例えば、メンバーシップ関数上で“大きい、中位、小さい”といった三つのファジイラベルの場合、この三つの分布の中から、最大の値を出力するアルゴリズムなので、出力におのずから制限が加えられてしまう。これに反して、N-Fシステムの場合には、しきい値や荷重値が数値で決められているので、かなり、細かい部分まで同定を行って出力値が決定される。これらの理由から、主たる目的が治水の場合には、N-Fシステムの方が、より細かな点でのダム操作が行なえる。このことを、前出の図-8と図-9とを比較することにより説明する。図-9は、ダム本来の一定量一定率の調節方式をとるようにセットし、ピークカット及び時間の遅延に成功した操作である。しかし、図-8のファジイシステムのみ応用した場合には、水文情報を前件部変数としてアルゴリズムの作成を行っているので情報の変化に反応し易いN-Fシステムに比べると、ピーク放流量は小さい。

## 6. 結論

本報告では、このダムにおけるシミュレータの評価の方法として4.1節に述べたピーク放流量と貯水量の二つを含む3つの評価項目を用いた、これは、このダムの運用上の面での理由からである。すなわち、この操作方式は、ピーク流入量に対応するような放流量の操作と可能なかぎりのピーク放流時間の遅延、洪水による出水量の一部をダム貯留にまわすことを考慮している。



図一八 Fシステムによる水位の変化図

本論文の主要な結論を述べる。

- (1) ダム操作支援制御システムにファジイシステムとニューラルネットワーク・ファジイシステムとを適用した結果、Fシステムは、主に利水を目的とした場合に有効な操作方式であり、N-Fシステムは治水を主とした洪水調節に有効な操作方式であると思われる。
- (2) 洪水期と非洪水期の洪水例により解析を行なったが、放流量を決定する部分での構造上の違いがある。すなわち、貯水時の入力となる流入変化量が非洪水期では、流入予測量を用いると良い操作結果が得られた。つまり、多目的ダムという特徴から、利水目的(非洪水期間)と治水目的(洪水期間)の違いにより操作量を決定する構造同定を変える必要性があることが分かる。
- (3) ダム容量のおおきい利水ダムの二山を持つ洪水で、ダム水位をシミュレータとオペレータによる操作で比較したが、ほぼ実操作に近い操作方式をとれた(例としては少ないけれども)。

## あとがき

ダム操作内規の設定が少ないために、ダム放流出線の傾きや操作開始のタイミングなど細かい部分での本制御システムの評価に関しては、マクロな面に限定されたが、今後、降雨パターンや地質条件等を

考慮した流出率の変化の予測などの情報をも取り入れた支援システムを構築し精度の良い操作をする必要があると思われる。現在、このような水文量を考慮した操作はダム管理者の判断に委ねられているのが現状である。このような点で、ダム管理指示者のヒアリング調査を基に教師データを作成すると、判断の基準が経験的なものなので、放流に関する操作にばらつきがでてしまう。このために、本論文においては細かい部分の基準は設けておらず、①放流量は、流入量のヒドログラフの増水部では、その量より小さくし、減水部では、放流曲線の傾きは、流入曲線の傾きを越えない。②時間当りの放流増分を操作内規規定以下にする。といった操作制限に付するものとした。しかし最近では渇水時の水運用が問題化されており洪水時のダム操作にも長期的展望に立った細かい管理が望まれている。こうした諸問題を含み置いて、今後は、ダム操作支援システムを正しく評価する基準を作成すること、例えば、放流後におけるダム利用者からダム下流域の河川水の有効利用等の聞き込みを行い、これらを参考にして評価基準を設ける等の検討を続けてゆきたい。

最後に、本論文の作成にあたり、図版、校正等に御協力してくれた宇都宮大学学生、加藤友美および立石弥保の両君に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Hasebe, M. Kumekawa, T. & Sato, T. : The application to the dam gate operation rule from a viewpoint of water resource by using various reasoning methods of fuzzy set theory, *Application Artificial Intelligence in Engineering* 7, pp. 561-578, 1992.
- 2) 長谷部正彦, 長山八州稔, 佐藤鉄也, 桑川高德 : ファジィ推論法の利水ダム操作制御への応用, *水資源に関するシンポジウム*, pp. 333-338, 1992.
- 3) 長谷部正彦, 長山八州稔, 桑川高德 : ファジィ理論のダム操作支援システムへの応用について, *水工学論文集*, 第37巻, pp. 69-74, 1993.
- 4) Hasebe, M. & Nagayama, Y. : Application on fuzzy set theory to the dam control system, *Trends in Hydrology*, 1, pp. 35-47, 1994
- 5) 長谷部正彦, 長山八州稔, 桑川高德 : 治水用貯水池操作へのファジィ・ニューラルネットワークシステムの適用について, *水工学論文集*, 第40巻, pp. 133-138, 1996.
- 6) 長谷部正彦, 長山八州稔, 桑川高德 : ニューラルネット・ファジィ理論による治水型ダム操作支援制御システムの適用について, *水文・水資源学会誌*, Vol. 10, No. 3, pp. 213-225, 1997.
- 7) 小尻利治, 藤井忠直 : 知識ベースを用いたファジィ貯水池操作に関する研究, *水工論文集*, 第34巻, pp. 601-606, 1990.
- 8) 小尻利治, 市川裕一 : 観測点の少ない地域における流出予測・貯水池操作, *土木学会第48回年次学術講演会概要集*, p. 334-335, 1994.
- 9) 池淵周一, 小尻利治, 宮川裕夫 : 中・長期気象予報を利用したダム貯水池の長期実時間操作に関する研究, *京都大学防災研究所年報*, 第33号, pp. 167-192, 1990.
- 10) 日野幹雄, 長谷部正彦 : フィルター分離AR法による非線型流出系の同定と予測 (時間単位), *土木学会論文報告集*, 第324号, pp. 83-94, 1982.
- 11) Hasebe, M., Hino, M. & Hoshi, K. : Flood forecasting by the filter separation AR method and comparison with modeling efficiencies by some rainfall-runoff models, *J. Hydrol.*, 110:107-136, 1989.
- 12) 菅野道夫 : ファジィ制御, *日刊工業新聞社*, 1988.
- 13) 水元雅晴 : ファジィ制御に関する改訂法 I-IV, *ファジィシステムシンポジウム*, 1987-1990.
- 14) 池田三郎 : GMDHと複雑な系の同定予測, *計と制御*, Vol. 14, No. 2, 1975.
- 15) 日向博文, 福西裕, 日野幹雄 : エキスパートシステムによるダム制御, *土木学会第44回年次学術講演会概要集*, pp. 162-163, 1989.
- 16) 高棟琢馬, 椎葉充昭, 堀智晴, 佐々木孝紀 : 洪水時支援エキスパートシステムについて - ファジィ推論システムの導入, *水文・水資源学会研究発表会要旨集*, pp. 254-257, 1990.

(1998. 4. 13受付)

## ON STUDY OF RESERVOIR OPERATION BY DAM CONTROL SYSTEM AIDING FUZZY SYSTEM AND NEURAL NETWORKS SYSTEM

Masahiko HASEBE, Yasutoshi NAGAYAMA , Mitsutaka KUROSAKI  
and Takanori KUMEKAWA

Now, in the past, we have investigated as to the dam control system for reservoir operation that the object of the use is clear, namely for irrigation or flood control.

In this study, as the subject of this paper, we are investigated for reservoir operation of the multipurpose dam, which the storage volume have comparatively much capacity. This control system for reservoir operation is aided by fuzzy system and neural networks system. It is investigated that the reservoir operation of multipurpose dam driven by the this control system, analyzing some floods for periods of flood season and non flood one, is effective or not in comparison with the operation by actual operator on the basis of the past operational rule.