システム制御情報学会論文誌 Vol. 4, No. 10, pp. 421～428, 1991

論　文

連接水系における実時間予測を併用したファジィ制御方式
—シミュレーションによる最適レギュレータとの比較*

田村坦之**・九津見　毅***・鳩野逸生**

Fuzzy Control of an Interconnected Multi-Reservoir Power System Combined with Real-time Prediction
—Comparison with Optimal Regulator through Simulation Studies*

Hiroyuki TAMURA**, Takeshi KUTSUMI*** and Itsuo HATONO**

This paper deals with fuzzy control of state variables in an interconnected multi-reservoir power system combined with real-time prediction. A mathematical model of the system in described as a discrete-time stochastic state-space model, including conditions which restrict the amount of water released from the upper stream reservoir and also restrict the method of discharging the water into the lower stream. In practice, it is required to notify few hours in advance the change of discharge into the lower stream. This is the reason why we need real-time prediction of the states for determining the amount of control well in advance. As the results of simulation studies we point out the effectiveness of fuzzy control compared with optimal regulator from the point of view of practical control of extending the durability of water gates and power generators.

1. まえがき

水力発電所を伴った多段ダム連接水系システムについて，測定・制御の遠隔操作化・集中化が進み，さらに省力化のため完全自動制御への要求が高まっている．しかし，多くの水系では，ある期間について流入量などの水系挙動の予測に基づいてその期間の放流計画を立てて発電使用水量のパターンを決定する，といった計画決定の段階にとどまっている．

水系の自動制御については多くの研究[1]がなされているが，実際の現場への適用があまり進んでいないのには次の二つの理由があると考えられる．ひとつは，制御系の構築に必要な状態量を知ることが困難なことである．連接水系を現代制御理論で定式化する場合，各地点の水量収支に着目して水系をモデル化して扱うのが一つの方法だが，このとき制御変数を決定するための状態変数の一つである貯水池への流入量を直接知ることは難しい[2]．一般的に言えば，制御のためには真の状態量（貯水池貯留量や河川流量）を正確に知る必要があり，実際には貯水池水位や河川水位観測値から換算してそれらの状態量を推定することになるが，モデリングの誤差や測定誤差の介入は避けられず，モデルに基づく制御理論ではこれらの誤差が制御結果に大きな影響を及ぼす．

もうひとつの理由は，制御の仕方そのもの，すなわちダム水門の開閉方法や発電量の変化のさせ方について，機械的耐久性の観点での望ましさを考慮した制御を従来の自動制御系で実現するのが困難な点にある．最適レギュレータなどで水位を制御する場合，定められた単一の目標値に水位を近づけようとして常に細かくゲートを動かすような制御動作となるが，実際にはそういった水門開閉操作は好ましくなく，水門を一度大きく動かした後はしばらくは動かさないといった配慮が必要である．人間が手でオペレートする場合は，水位が目標値付近にありさえすれば水門開閉操作は間欠的にしか行なわれなく，それで十分に制御目的を達成しているが，自動制御系にこういった点を反映させるのは非常に難しい．

近年，各分野で注目されているファジィ制御[3]は，人間の制御ノウハウを反映させやすいことや，制御対象の

* 原稿受付　1990. 11. 27
** 大阪大学　工学部 Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University ; 2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka 565, JAPAN
*** 大阪大学　工学部（現在　シャープ㈱）
Key Words : real-time reservoir control, interconnected multi-reservoir system, fuzzy control, real-time prediction, durability of control devices.

物理モデルが不明確であっても表面的な状態量がわかれば制御できるといった特徴があり，前述のような問題を持つ対象の制御に適していると思われる．

本論文では，連接水系に対して，モデルを用いて実時間予測を併用したファジィ制御を適用することを考える．ここでは，下流への放流の仕方に厳しい制約条件を持つ実在する某水系をモデル化し，主として現代制御理論に基づく最適レギュレータによる制御と比較して計算機シミュレーションを実行することにより，上記のような問題点に対するファジィ制御の効果を調べていく．

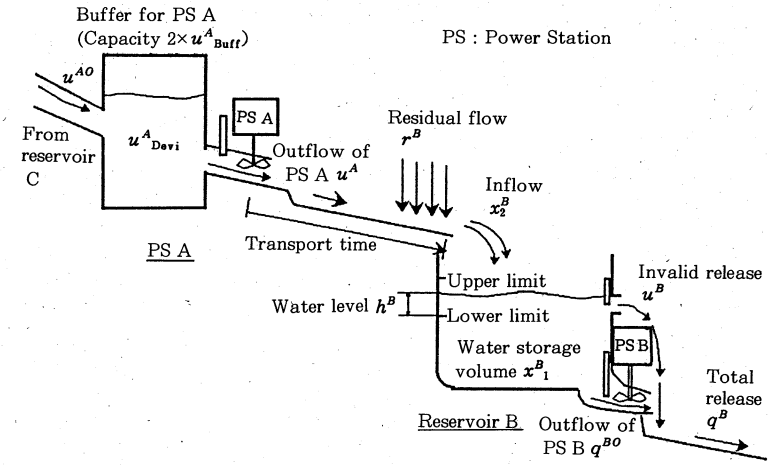


Fig. 1　Physical configuration of an interconnected multi-reservoir power system

2. システムの定式化

2.1 モデリング

ここで扱う水系は実際には10箇所以上のダムや貯水池からなる大規模なものだが，本論文ではFig. 1に示すようにその最終2段のダム・発電所を観測・制御の対象とする．最終段のダムをBダム（B発電所を併設），その直上の水路式の水力発電所をA発電所とする．Bダムへの流入量のうち，A発電所から来る水量以外の量をBダムへの横流入量と称する[4]．

一般に，発電所連接水系の制御方策について注意すべき点をまとめると，ほぼ次の4点になる．

① ダムや貯水池の貯留量は上下限を守っていること．

② 発電量の目標値は，他の発電所（火力や原子力なども含む）も含めた地域全体の発電計画から決まってきているので，一日の総量はもちろん時々刻々においても発電量はなるべく目標値を守っていること．

③ 河川沿岸住民にとって生活や産業の立場から適切な流量の水が河川を流れていること．

④ ゲートや発電機に無理を強いる操作はなるべく避けること．

さらに，このモデルの観点からみて，この水系に特有の制約条件は次のようなものである．

(a) Bダム水位の許容範囲は，ある高さを基準として0 m以上1 m以下，できれば20 cm以上80 cm以下に保つことが望ましい．

(b) 運転の仕方は，A・B発電所ともに，まず季節その他の情報や大まかな流入量予測により1日の発電使用水量を決め，そこから既定の計算式により1日の放流パターンを決定する．オンライン制御する際にはこの値を目標値とする．

(c) A発電所の上流には大容量のダム（Cダムとする）があり，A発電所の使用水量パターンは実質的にCダムによって決まっている．制度上の理由によりCダムのオンライン制御はできない．よって，A発電所はオンライン制御できるといってもおのずと制限を受ける．

(d) Bダムからの放流量は発電使用水量と無効放流量からなる．目標値として定めるのは発電使用水量であり，予定外に動かすのは無効放流量である．ただし，無効放流量の値はマイナスとなることもあり，その場合は発電使用水量を予定よりも減らすと解釈する．しかしBダムは水系の最終段であるので予定外の制御はなるべく避けたい．予定外放流が避けられない場合は放流する2時間前に予告する必要がある．そして予定外放流の際の放流量増加速度は30分あたり20 m^3/secを越えないことが望ましい．

以上の定義と条件に基づき，シミュレータの構築といくつかの制御方法の適用のために，水量収支に着目して離散系の状態遷移式を次のように定式化する[5]．

状態遷移式：

$$x_1^B(k+1)=x_1^B(k)+x_2^B(k)-q^{BO}(k)-u^B(k)+v_1^B(k) \quad (1)$$

$$x_2^B(k+1)=u^A(k)+r^B(k+1)+v_2^B(k) \quad (2)$$

観測方程式：

$$y^B(k)=x_1^B(k)+w^B(k) \quad (3)$$

ここに

$x_1^B(k)$：時刻 k のBダム貯留量 [m^3]

$x_2^B(k)$：時刻 k から $k+1$ までの ΔT 間のBダムへ

の流入量 [m^3]

$q^{BO}(k)$：時刻 k から $k+1$ までの ΔT 間のB発電所使用水量計画値 [m^3]

$u^B(k)$：時刻 k から $k+1$ までの ΔT 間のBダム予定外放流量 [m^3]

$u^A(k)$：時刻 k から $k+1$ までの ΔT 間のA発電所使用水量 [m^3]

$r^B(k)$：時刻 k から $k+1$ までの ΔT 間のBダムへの横流入量 [m^3]

$v_1{}^B(k)$：$x_1{}^B(k)$ のシステムノイズ

$v_2{}^B(k)$：$x_2{}^B(k)$ のシステムノイズ

$y^B(k)$：$x_1{}^B(k)$ の観測値

$w^B(k)$：$x_1{}^B(k)$ の観測ノイズ

ΔT：サンプリング間隔 [sec]

ただし ΔT はA発電所からBダムへの平均流下遅れ時間に等しくとり，15分とする．

水位換算式：経験的に知られている換算式があり

$$h^B(k)=f_h{}^B(y^B(k)) \tag{4}$$

の形で表現されている．ここで

$h^B(k)$：Bダム水位

$f_h{}^B(*)$：Bダム貯留量から水位への換算式

ここでのファジィ制御では後件部に制御変数の変化速度を含めるので，放流量変化を次のように定式化しておく．

$$u^A(k)=u^A(k-1)+\Delta u^A(k) \tag{5}$$

$$u^B(k)=u^B(k-1)+\Delta u^B(k) \tag{6}$$

ここに

$\Delta u^A(k)$：A発電所使用水量変化量

$\Delta u^B(k)$：Bダム予定外放流量変化量

前述の制約条件 (b) と (c) を考えると，A発電所使用水量は，各時刻ごとの通過量だけでなく累積通過量についても制限しておく必要がある．A発電所を通る水は原則としてCダムから来た量そのものであるが，ある程度のずれは許され，また途中に小容量のダムがある．これらを考え，CダムとA発電所の間に何らかの水量バッファが存在すると仮定し，これをAバッファと称する．このようにすれば，Cダムの放流量をA発電所使用水量の目標値と考えると，運用の際には，A発電所使用水量の累積値とその目標とのずれが，そのままAバッファ貯留量の増減に反映される．シミュレーションの際には，開始時のAバッファ貯留量を初期値とし，ある許容範囲（ここではAバッファ要領の1/2とする）を越えることを，次のようにしてシミュレータ側で強制的に阻止すればよい．

$$u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)=\sum_{i=1}^{k-1}u^A(i)-\sum_{i=1}^{k-1}u^{A0}(i) \tag{7}$$

$$|u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)|\leqq u^A{}_{\mathrm{Buff}} \tag{8}$$

ここに

$u^{A0}(k)$：A発電所使用水量計画値

$u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)$：A発電所使用水量累積値の計画値との差

$u^A{}_{\mathrm{Buff}}$：Aバッファの容量の1/2

2.2 実時間予測

前節で示した本水系の固有の制約条件のなかで最も厳しいといえる条件は，Bダムの予定外放流をするにあたっては2時間前に予告する必要があるという点である．この条件を満たすために，シミュレーションモデルを用いた時々刻々の予測を行なう．

時刻 k においてA発電所使用水量 $u^A(k)$ が決定され，それを適用すると時刻 $k+1$ の状態量が得られる．この時点で，時刻 $k+9$ のBダム予定外放流をするかしないかを予告しなければならない．Bダム予定外放流を決める制御系にとっては，$u^B(k+9)$ を決定するために，この時点で時刻 $k+9$ におけるBダムに関する各種の状態量の予測値が得られている必要がある．これを得るために，オンライン制御中の各時刻において，モデルに基づくシミュレータを現在時刻から8ステップ後まで動作させ（そのシミュレータ動作の各ステップにおいても，A発電所使用水量決定のためのファジィ制御をシミュレータ内で動作させる），8ステップ後の各状態量を求める．その概念図をFig. 2に示す．

この予測を併用した制御を行なうためには，Fig. 2に示したように予測のためのシミュレータ部分に横流入量の未来値を与える必要がある．ここでは，$r^B(k-7)$ から $r^B(k)$ までの過去8ステップの実際の横流入量を最小二乗法により直線近似して，それを未来の時刻に延長し，予測値 $r^B{}_{\mathrm{Pred}}(k+2)$ から $r^B{}_{\mathrm{Pred}}(k+9)$ までを求めて用いる．

2.3 ファジィ制御系

以上のように定式化した連接水系のモデルに，Mamdani[6] の方法によるファジィ制御[7] を適用し，制御系を構築する．

この連接水系で制御すべき項目はA発電所使用水量 $u^A(k)$ とBダム予定外放流量 $u^B(k)$ である．まず $u^A(k)$ を制御するためのファジィ推論の前件部と後件部を次のように定める．

○A発電所のファジィ制御

前件部：Bダム水位 $h^B(k)$

Bダム水位の変化量 $\Delta h^B(k)$

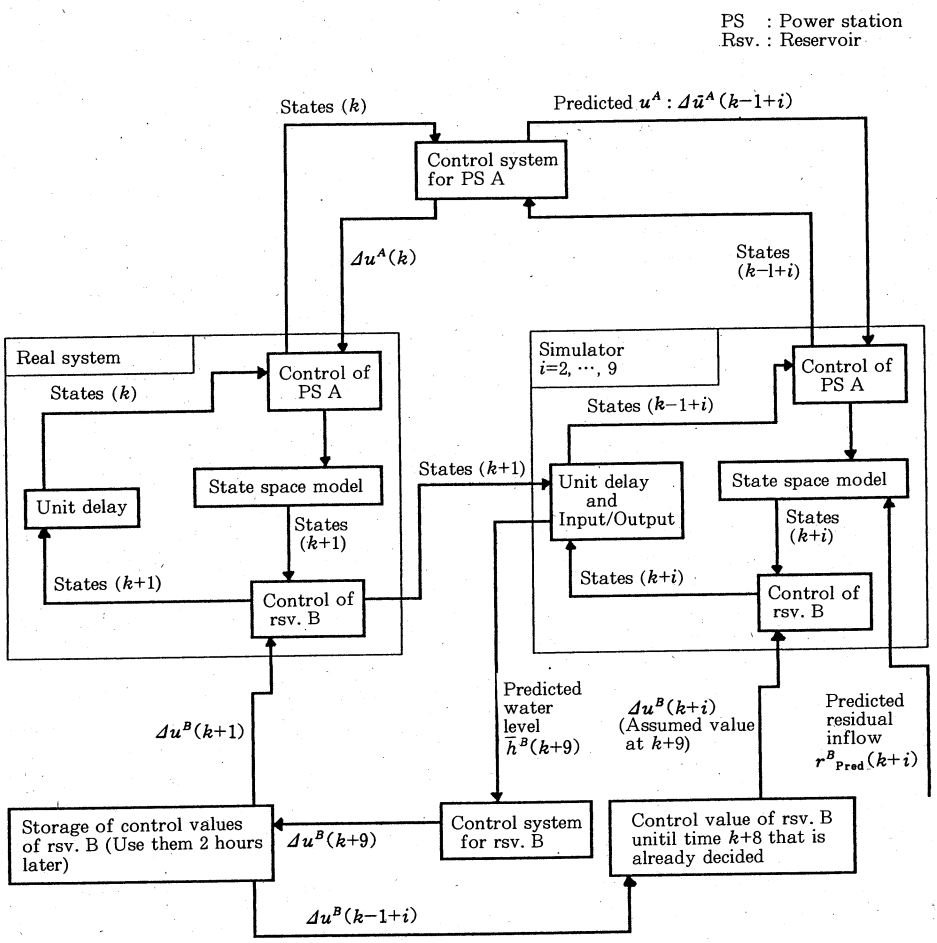


Fig. 2 Block diagram of a fuzzy control system combined with real-time prediction

A 発電所使用水量累積値の計画との差 $u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)$

A 発電所ゲート操作頻度 $u^A{}_{\mathrm{Freq}}(k)$

後件部：A 発電所使用水量変化量 $\Delta u^A(k)$

ある制御変数の値を決定するために，前件部として主要な状態量（ここでは B ダム水位）とその変化量をとり，後件部として制御変数の変化量をとることは，ファジィ制御系の定式化として自然であり，よく用いられる．ここではそのほかに，**2.1** の ② の条件を満たすために $u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)$ と，④ の条件を満たすために $u^A{}_{\mathrm{Freq}}(k)$ とを前件部に用いている．$u^A{}_{\mathrm{Freq}}$ については後で述べる．ここで $\Delta h^B(k)$ は次のように定義される．

$$\Delta h^B(k) = h^B(k) - h^B(k-1) \tag{9}$$

つぎに，$u^B(k)$ を操作するためのファジィ推論の前件部と後件部を次のように定める．

○ B ダムのファジィ制御

前件部：9 ステップ後の B ダム予測水位 $\bar{h}^B(k+9)$

9 ステップ後の B ダム予測水位の変化量 $\Delta\bar{h}^B(k+9)$

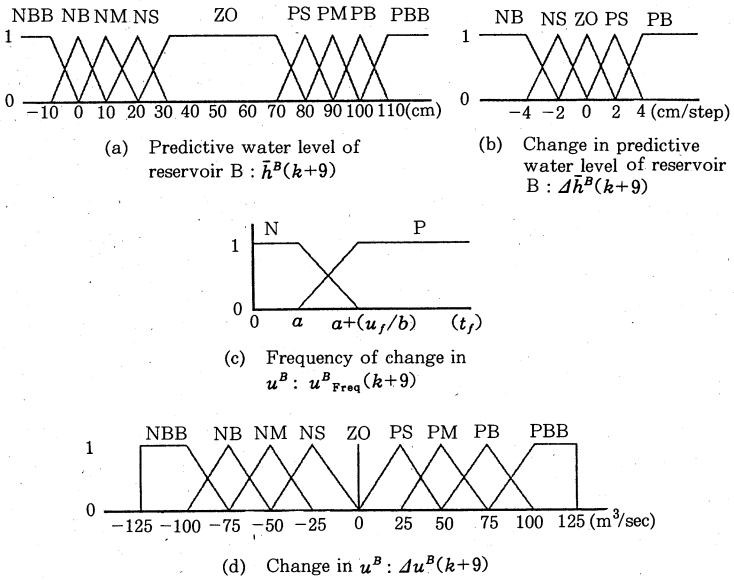
8 ステップ後までの B ダム予定外放流量変化頻度 $u^B{}_{\mathrm{Freq}}(k+9)$

後件部：9 ステップ後の B ダム予定外放流量変化量 $\Delta u^B(k+9)$

ここで時刻が $k+9$ になっているのは **2.2** で述べたように 2 時間後の予測を併用した制御を実行しているからである．

各変数のファジィ集合ラベルを，三角形と台形を基調としたファジィ集合で定める．一例を Fig. 3 に示す．

B ダム水位については，「単一の目標値に合わせるのではなく，上下限内に入っていればよい」という本システムの趣旨に基づき，Fig. 3 (a) に示すような分けかた



(a) Predictive water level of reservoir B : $\bar{h}^B(k+9)$

(b) Change in predictive water level of reservoir B : $\Delta\bar{h}^B(k+9)$

(c) Frequency of change in u^B : $u^B{}_{\mathrm{Freq}}(k+9)$

(d) Change in u^B : $\Delta u^B(k+9)$

Fig. 3 Fuzzy sets for fuzzy control of discharge from

にしている点に特長がある．

後件部の変数については，2.1の条件④を参照して「小刻みな制御はなるべく避けたい」という趣旨に基づき，Fig. 3 (d) のように，「ゼロ付近」の集合「$Z0$」を0だけのシングルトンとした．こうすると，Mamdani の方法で推論したときに，後件部が $Z0$ となるルールがほかのルールとともに採用された場合にも $Z0$ に対する面積が0なので重心の計算に全く寄与せず，最終的に $\Delta u^A(k)$ や $\Delta u^B(k+9)$ の絶対値が大きめの値に決まる．結果的に，$Z0$ を0だけのシングルトンとした場合は，後件部が $Z0$ のルールは存在しないのと同等になる．

ここで，A・Bそれぞれの「放流量変化頻度」や「水門操作頻度」を表わす関数，$u^A{}_{\mathrm{Freq}}$ および $u^B{}_{\mathrm{Freq}}$ を定義する[8]．これを一般に u_{Freq} と表記する．時刻 k において直前に使用水量を変化させた量を u_f [m³/sec]，その後使用水量を一定に保持している時間を t_f [step] とすると，パラメータ a と b を用いて，

• $t_f \leqq a$ の場合

$$u_{\mathrm{Freq}}(k+1)=0 \tag{10a}$$

Table 1 Fuzzy control rules for PS A

(a) $u^A{}_{\mathrm{Freq}}(k)=$ "P"
$u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)=$ "$Z0$"

$h^B(k)$ \ $\Delta h^B(k)$	NB	NS	ZO	PS	PB
PB			NB	NB	NB
PM			NM	NM	NB
PS			NS	NS	NM
ZO					
NS	PM	PS	PS		
NM	PB	PM	PM		
NB	PB	PB	PB		

(b) $u^A{}_{\mathrm{Freq}}(k)=$ "P"
$u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)=$ "P"

$h^B(k)$ \ $\Delta h^B(k)$	NB	NS	ZO	PS	PB
PB			NB	NB	NB
PM			NM	NM	NB
PS			NS	NS	NM
ZO					
NS	PS	ZO	ZO		
NM	PM	PS	PS		
NB	PB	PB	PM		

(c) $u^A{}_{\mathrm{Freq}}(k)=$ "P"
$u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)=$ "N"

$h^B(k)$ \ $\Delta h^B(k)$	NB	NS	ZO	PS	PB
PB			NM	NB	NB
PM			NS	NS	NM
PS			ZO	ZO	NS
ZO					
NS	PM	PS	PS		
NM	PB	PB	PM		
PM	PB	PB	PB		

(d) $u^A{}_{\mathrm{Freq}}(k)=$ "N"
$u^A{}_{\mathrm{Devi}}(k)=$ Any value

$h^B(k)$ \ $\Delta h^B(k)$	NB	NS	ZO	PS	PB
PB			NM	NM	NM
PM					
PS					
ZO					
NS					
NM					
NB	PM	PM	PM		

Table 2　Fuzzy control rules for reservoir B

(a)　$u^A_{\mathrm{Freq}}(k+9)=$ "P"

$\bar{h}^B(k+9)$ \ $\Delta\bar{h}^B(k+9)$	NB	NS	ZO	PS	PB
PBB			PB	PBB	PBB
PB			PM	PB	PB
PM			PS	PM	PM
PS				PS	PS
ZO					
NS	NS	NS			
NM	NM	NM	NS		
NB	NB	NB	NM		
NBB	NBB	NBB	NB		

(b)　$u^A_{\mathrm{Freq}}(k+9)=$ "N"

$\bar{h}^B(k+9)$ \ $\Delta\bar{h}^B(k+9)$	NB	NS	ZO	PS	PB
PBB			PM	PB	PB
PB					
PM					
PS					
ZO					
NS					
NM					
NB					
NBB	NB	NB	NM		

• $a \leqq t_f \leqq a+u_f/b$ の場合

$$u_{\mathrm{Freq}}(k+1)=\frac{t_f-a}{u_f/b} \tag{10b}$$

• $a+u_f/b \leqq t_f$ の場合

$$u_{\mathrm{Freq}}(k+1)=1 \tag{10c}$$

となる．パラメータ a と b は，A発電所制御に関しては $\{a=1,\ b=4\}$，Bダム制御に関しては $\{a=1,\ b=3\}$ としておく．

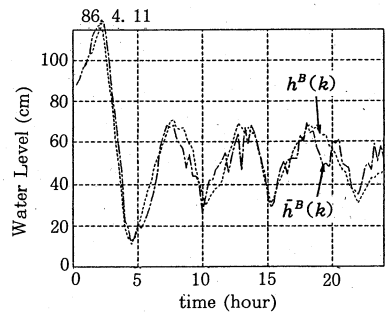
これのファジィ集合は Fig. 3 (c) に示す．「P（保持時間大）」「N（保持時間小）」の二つである．上で定義したのは「P」のメンバーシップ関数であり，「N」のメンバーシップ関数は1から「P」のそれを引いた値とする．

この関数は，制御変数を動かしていない状態が長く続いているときは1を示していて，制御変数を少しでも動かすと0になるが，その後，徐々に1に回復する．動かした量が大きいときは回復速度が遅くなる．回復の途中でも制御変数を動かすとまた0になってしまう．このような特性により，1回に動かす量が少なくても制御変数を終始動かしっぱなしであればずっと0が続くし，一度動かしてしばらくは動かさない場合でもその動かした量によって示す値が異なり，水門や発電機の耐久性を考慮した操作方法の望ましさを見るのに適していると思われる．

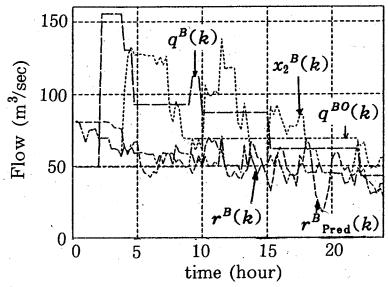
次に制御ルールを考える．通常のファジィ制御では，状態量が目標値付近であってもその変化速度の絶対値が大きければそれを抑制する方向に制御するが，ここではオペレータの制御ノウハウを反映させて無駄な制御を避けるため，水位が上下限に近づいている（あるいは越えている）場合以外は制御変数を操作しないことにする．さらに，ゲートの耐久性の立場から操作頻度を減らすことを考えて，変化頻度関数がファジィラベル「N」を示しているときは，水位が許容範囲を大幅に外れている場合以外は操作しないことにする．このような観点から求めたA発電所およびBダムの制御ルールを各々 Table 1 および Table 2 に示す．

3. 数値実験

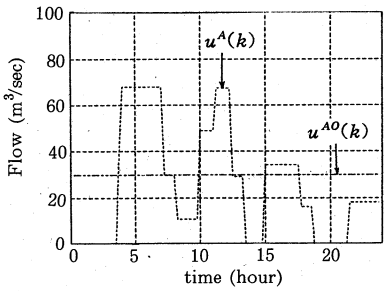
以上に述べた原理に基づいてファジィ制御系を構築し，シミュレーションを行なった結果の一例を Fig. 4 に示



(a)　Water level of reservoir B

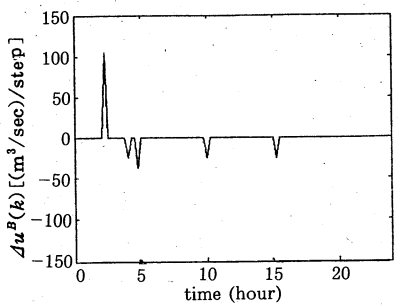


(b)　Discharge and inflow of reservoir B

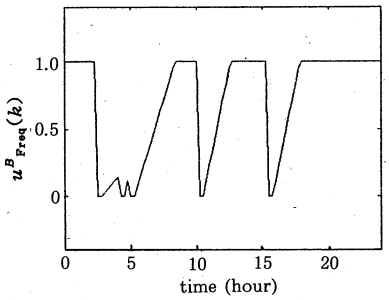


(c)　Outflow of PS A

Fig. 4　State and control trajectories when both PS A and reservoir B are controlled by fuzzy controller



(a) Change in invalid discharge of reservoir B



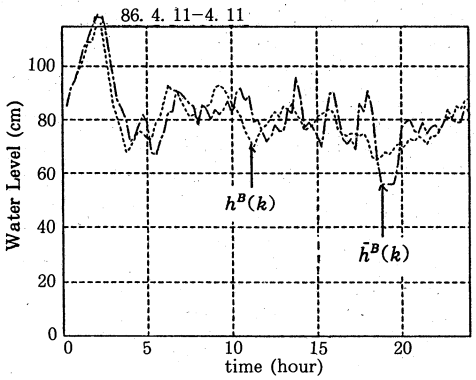
(b) Frequency function of change in invalid discharge of reservoir B

Fig. 5 Some characteristics for invalid discharge of reservoir B with Fuzzy Controller

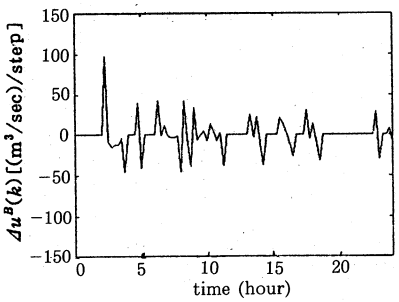
す．また，Fig. 5 は B ダム予定外放流量に関する特性値を示すもので (a) は各ステップごとの予定外放流量の変化量を示し，(b) はその変化頻度関数の値を示す．比較参考のため，最適レギュレータによって制御した場合を Fig. 6 に示す．ここで比較対象とした最適レギュレータは，2 時間後の予測水位が上下限を外れていれば制御系の指令に基づいて B ダムの予定外制御を 2 時間後に行ない，そうでなければ B ダムは制御しないというものである．ここで，予測のための制御にも最適レギュレータを用いる．なお，最適レギュレータによる制御方式の詳細は参考文献 4) を参照されたい．

ファジィ制御の場合，Fig. 4 (a) のように 5 時以降は水位は 20～80 cm の間にうまくおさまっているのに対して，最適レギュレータを適用した場合は Fig. 6 (a) に示すように 80 cm 程度からあまり下がらない．B ダム予定外放流量は，ファジィ制御だと Fig. 4 (b) や Fig. 5 (a) が示すように間欠的に変化しているが，レギュレータでは水位が 80 cm を越えているかぎり Fig. 6 (b) のように常に変化する．

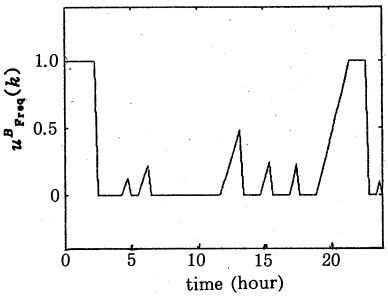
このシミュレーションによって，B ダムの放流のさせ方に関するいくつかの指標を求めて最適レギュレータによる結果と比較すると次のようになる．ただし，モデル中で発生させているシステムノイズや観測ノイズの挙動



(a) Water level of reservoir B



(b) Change in invalid discharge of reservoir B



(c) Frequency function of change in invalid discharge of reservoir B

Fig. 6 Water level and some characteristics for invalid discharge of reservoir B with Optimal Regulator

により結果が多少異なるので，以下の値は同じ条件でシミュレーションを 50 回くり返した結果の平均値である．B ダム予定外放流量増加速度が 40 (m^3/sec)/hour を越えた回数はレギュレータが 4.7 回に対してファジィ制御が 1.1 回，予定外放流の予告を出した回数はレギュレータが 51 回に対してファジィ制御が 7.5 回，予定外放流量変化頻度関数の一日平均値はレギュレータが 0.20 に対してファジィ制御が 0.45 で，レギュレータに比べて実用面でのファジィ制御の良さが際立っている．

とくに，B ダムは本連接水系流域の最終段にあたり，下流沿岸の住民の立場から，予定外放流の変化をできる

だけ避けることが望まれているが，ファジィ制御が最適レギュレータに比べて格段に優れていることが分かる．その理由は，Bダムの水位が上限の80 cmを越えているか否かによって最適レギュレータは常に動作し，予定外放流の変化を繰り返すことになるが，ファジィ制御では過去の予定外放流変化の頻度が高い場合にはTable 2 (b) に見られるように，予測水位がPBBすなわち相当はずれない限り予定外放流を変化させないという制御規則が有効に作用しているためと思われる．これはBダムゲートの操作頻度をおさえるため，ダムゲートの機械的耐久性の面からも役に立っている．

4. むすび

実在する連接水系のモデルで実際の計画決定法と実績データに対してファジィ制御と実時間予測を組み合わせて，直列に連なる水力発電所とダムとを制御してダム水位の自動調整をするシミュレーションを行なった．結果として，多くの場合でファジィ制御は最適レギュレータよりも良い制御結果を示し，とくにBダムにおける予定外放流の抑制および発電機やダムゲートの耐久性を考慮した制御という点では，最適レギュレータでは実現できない非常にすぐれた制御特性がファジィ制御により実現できた．

実系に適用する場合には，Fig. 2における「Real System」の部分が実系によって構成される．その際，横流入量 $r^B(k)$ をいかに正確に予測するかが一つの鍵になるものと思われるが，これについては参考文献2)を参照されたい．

今後の課題としては，メンバーシップ関数や制御ルールをさらに調整して最適化を図ることや，さらに大規模なシステムを定式化してファジィ制御の有効性を確認し，現実の水系への適用可能性をより高めることが挙げられる．

おわりに，本研究の遂行にあたって観測データや水系管理関連資料をご提供いただき，さらに有益なご討論を賜った文部省統計数理研究所の予測制御系の方々ならびに九州電機製造㈱技術部の方々に深甚の謝意を表する．また，本研究には稲盛財団助成金の援助を頂いたことを付記し謝意を表する．

参考文献

1) E. F. Wood (ed.) : Real-Time Forecasting/Control of Water Resources Systems, Pergamon Press, Oxford (1980)
2) T. Ozaki, L. K. Hotta, H. Nakamura, R. Seki, H. Tamura, K. Tanabe and H. Akaike : Nonlinear Prediction of Water Flow in an Interconnected Multi-Reservoir Power System ; Proc. 4th IFAC Int. Symp. on Systems Analysis Applied to Management of Water Resources, pp. 181～189 (1988)
3) 菅野：ファジィ制御，日刊工業新聞社 (1988)
4) H. Tamura, T. Kutsumi, H. Nakamura, R. Seki, K. Tanabe and T. Ozaki : Kalman Filtering and Control of Water Level in an Interconnected Multi-Reservoir Power System ; In M. Jellali ed. : Systems Analysis Applied to Management of Water Resources, pp. 73～78, Selected Papers from 4th IFAC Symposium (1988)
5) 和歌森，船橋，増位：洪水時の多段ダム最適放流計画法；電気学会論文誌 C, Vol. 102, No. 2, pp. 9～16 (1982)
6) E. H. Mamdani : Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant ; Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1585～1588 (1974)
7) M. Mizumoto : Fuzzy Control under Various Fuzzy Reasoning Methods ; Information Science, Vol. 45, pp. 129～151 (1988)
8) 安信，宮本，井原：Fuzzy 制御による列車定位置停止制御；計測自動制御学会論文集，Vol. 19, No. 11, pp. 873～880 (1983)