

ファジイ理論を用いた洪水時発電用ダムゲート制御モデルの構築

A FUZZY GATE OPERATION MODEL OF HYDRO-POWER PLANT FOR FLOOD SITUATION

* ** *** ****
吉村 清宏 ・ 勝田 栄作 ・ 高棹 琢馬 ・ 堀 智晴

By Kiyohiro YOSHIMURA, Eisaku KATSUTA, Takuma TAKASAO and Tomoharu HORI

A gate operation model for the hydro-power plant during a flood is proposed by the use of fuzzy theory. First, three types of empirical equation which decide the target release are extracted from the questionnaire to gate operators. Second, the parameters of these equations are determined through fuzzy inference from deviation of water level, change of the deviation and changing rate of inflow discharge. The operation model proposed here is applied to the real hydro-power plant and it is verified that the system performance is almost at the same level of that of skilled operators.

Keywords : hydro-power plant , gate operation , fuzzy theory

1. はじめに

発電用ダムの操作方法は、その運用目的、規模によって異なるが、河川管理者の承認を得た『操作規程』により各ダム毎に定められている。操作の特徴として、治水ダムでは洪水のピークカットを行うのに対し、発電用ダムではピークカットは行わず、流入量が洪水量（ダム下流に被害の生じない最大流量で当該ダム操作規程に定められている）に達するまでに貯水位を予備放流水位に低下させ、その後は放流量を流入量に等しくすることが挙げられる。

ダムゲートの操作を大別すると、貯水位を予備放流水位に低下させる水位低下制御、水位を一定に保つ定水位制御、貯水位を発電目標水位に回復させる貯留制御となる。

水位低下制御とは洪水警戒時において貯水池水位を予備放流水位に下げる制御を示す。なお、水位を低下させる際には当然のことながら放流量を流入量より多くすることとなるが、その放流量の増加は下流の急激な水位上昇を避けることを目的として各ダム毎に操作規程に記載されたいわゆる別図第2によってその上限値が原則として定められている。

-
- | | |
|-------------|--|
| * 正会員 | (株) ニュージェック 副社長
(〒 542 大阪市中央区島之内 1-20-19) |
| ** 正会員 | 関西電力(株) 宇奈月水力発電所建設所
(〒 938-02 富山県下新川郡宇奈月町赤田 3421-1) |
| *** 正会員 工博 | 京都大学教授 工学部土木工学科
(〒 606-01 京都市左京区吉田本町) |
| **** 正会員 工博 | 京都大学講師 工学部土木工学科 (同 上) |

定水位制御は洪水警戒時に予備放流水位に低下させた貯水池水位を洪水期間中一定に保つ洪水時定水位制御、非洪水時に貯水池水位を発電目標水位に保つ非洪水時定水位制御の2つに分けられる。

貯留制御は洪水処理時が終了した後、貯水池水位を発電目標水位まで上昇させる制御を言い、基本的には水位低下制御の逆の制御となる。

本研究ではこれら一連のゲート操作にファジイ理論を適用した制御モデルを構築し、その適用性について検討を行った。

2. 発電用ダム操作の現状とファジイ理論

発電用ダム調整池は一般に調整池容量が小さく、治水ダムに比べると予測誤差（流入量の予測誤差等）を吸収する余裕が少ない。また、調整池容量が小さいことも関係してか、出水時には調整池水面の振動も見られ現状の水位すら把握しづらいこともある。当然のことながら、水位の時間変化より算出される貯留量変化率と放流量より計算される流入量の計算（観測）精度も自ずと制限される。

現状では操作員が長年に渡って蓄積したノウハウに基づいて、時々刻々変化する水位、雨量等の情報に対応してダム操作を行っている。出水時にはこのような状態が昼夜を問わず数日間に渡って続くことも間々あり、ダム操作員にとって過酷な業務となっている。

このような状況に対応することを目的として自動制御装置が導入されている発電用ダムも多々ある。しかしながら、定水位制御を例にとると調整池水位と目標水位との偏差が生じると、即座に対応するためいわゆるハンチング現象等が見受けられ、熟練操作員の操作とは大きく異なるものとなるため有効利用されていないのが現状である。

ダムゲート制御モデルにファジイ理論を適用することにより、ファジイ制御理論の持つ補間特性を利用しスムーズで自然な操作結果が期待でき、熟練操作員の操作方法を踏襲したシステムの構築が可能になると考えられる。さらに今後予測される熟練操作員の不足に対応することも可能であると考えられる。

以上の視点から、小尻らは、パターン認識とファジイ理論を組み合わせた洪水用貯水池の操作手順を提案している¹⁾。また、高嶋、鈴木、荒巻らは、発電用ダムゲートの自動制御について、目標放流量決定に流入予測を用いるフィードフォワード制御を導入するとともに、ファジイ制御を取り入れて制御量を変化させるなど、熟練操作員に近い微妙な操作を実現することを目的として検討を行っている。そこでは、「定水位制御」などにおいて、制御の目標水位と現在水位の関係から制御量の決定にファジイ制御を採用している。その結果、ファジイ制御を導入したことより、放流量のハンチングを防ぐことができ、熟練操作員同様の微妙なゲート操作が可能になったとしている²⁾。

山本、勝田らは高嶋らと同様にゲートの自動制御を目的として、目標放流量決定にファジイ制御を取り入れ、制御の範囲を「定水位制御」ばかりでなく、「水位低下制御」、「貯留制御」にも拡張したモデルを報告している³⁾。

本研究は山本、勝田らの研究の目標放流量の計算式に改良を加え、研究をさらに進めたものである。

3. ファジイ制御モデルにおける目標放流量計算式

洪水時のダムゲート操作にあたっては、次回ゲート操作の制御量を予め決定する必要がある。制御量を決めるためには目標とする放流量を決定する必要があり、この放流量をここでは目標放流量と呼ぶこととする。目標放流量の計算式として現地ダム操作員が経験的に習得し、現実に活用している方式等をヒアリングを実施することにより調査し、以下の3式を設定しシミュレーションに用いた。

なお、以下の式に含まれる α 、 β をファジイ推論で決定する。この方法によれば、目標放流量を水位変化などから直接ファジイ推論で決定するよりも、より実務者に近い操作が期待でき、推論ルールの作成も容易になると考えられる。

①流入量基本式

$$QM = \{1.5QI_{-m} - 0.5QI_{-m-N} + m(QI_{-m} - QI_{-m-N}) / N\} + \alpha |V(\Delta h)|$$

②放流量基本式

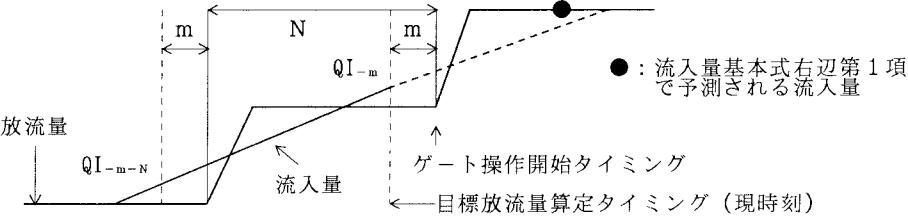
$$QM = QO_{-m} + \beta |\Delta QI| + \alpha |V(\Delta h)|$$

③流入量基本式改良型

$$QM = QI_{-m} + \beta |\Delta QI| + \alpha |V(\Delta h)|$$

ここに、 QM は目標放流量を示す。 QI 、 QO はそれぞれ流入量、放流量を示し、下添字は次回ゲート操作開始時より遡った時間を示す。 N はゲート操作間隔を示し、通常10分とされている。 ΔQI は流入量変化を示し $\Delta QI = QI_{-m} - QI_{-m-N}$ である。 Δh は水位偏差（観測貯水位－目標水位）を示し、 $V(\Delta h)$ は水位偏差に相当する貯水容量を示す。 α 、 β は $-1 \leq \alpha$ 、 $\beta \leq 1$ とした。

流入量基本式の右辺第1項はゲート操作開始時より m 分前（目標放流量算定タイミング）流量 QI_{-m} と $m+N$ 分前の流入量 QI_{-m-N} を用い直線外挿補完した $N/2$ 分後の予測流入量を示す。なお、この流入量は次回操作時 N 分間の平均流入量を予測したものとなっている（図－1）。



図－1 流入量基本式の右辺第1項の説明

4. メンバシップ関数と制御規則

目標放流量算定に係わる係数 α 、 β を決定するための制御規則を以下に示す。なお、ファジィ推論の方法には『min-max-重心法』⁴⁾を用いた。前件部変数の設定にあたっては、操作員に対するヒアリング結果等を参考に設定した。また、メンバーシップ関数の同定は基本的には熟練操作員の操作結果を教師データとして使用することによって行った。

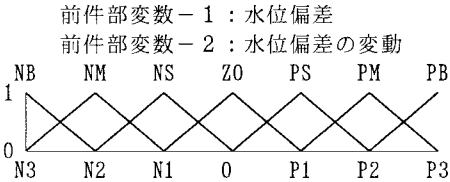
なお、制御規則中に示されている『・・』はありえない操作として規則から除外したことを示す。

4. 1 水位偏差に乘じる係数 α の制御規則

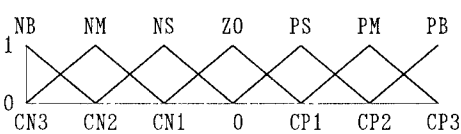
前件部変数として以下に示す水位偏差、水位偏差の変動、流入量変化を設定した。

- 水位偏差（cm）＝現時点の調整池水位－目標水位
- 水位偏差の変動（cm）＝現時点の水位偏差－前回算定時の水位偏差
- 流入量変化率（％）＝（現時点流入量－前回算定時の流入量）／現時点流入量×100

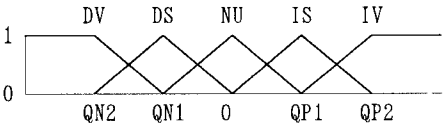
①前件部変数のメンバーシップ関数



②後件部変数のメンバーシップ関数



前件部変数－3：流入量変化率



- NB: Negative Big
- NM: Negative Medium
- NS: Negative Small
- ZO: Zero
- PS: Positive Small
- PM: Positive Medium
- PB: Positive Big
- DV: Decrease Very
- DS: Decrease Slightly
- NU: Neutral
- IS: Increase Slightly
- IV: Increase Very

③制御規則

前件部変数－3をDS、NUに固定した時の制御規則を例として以下に示す。

		前件部変数－3：DS						
		前件部変数－2						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
前件部変数－1	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	..
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	..	..
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	..	..
	PM	NS	ZO	PS	..	..	..	..
	PB	ZO	PS	..	..	..	..	..

		前件部変数－3：NU						
		前件部変数－2						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
前件部変数－1	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

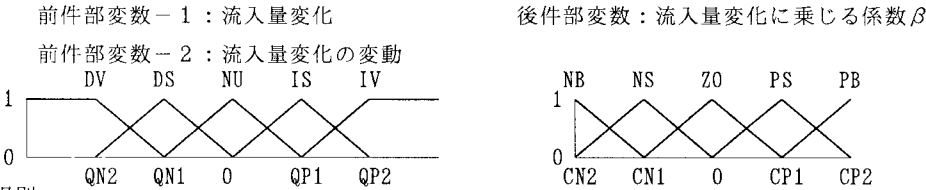
4. 2 流入量変化に乗じる係数βに係わる制御規則

前件部変数として以下に示す流入量変化、流入量変化の変動を設定した。

流入量変化 (m³/s) = 現時点流入量－前回算定時の流入量

流入量変化の変動 (m³/s) = 現時点の流入量変化－前回算定時の流入量変化

①前件部変数及び後件部変数のメンバーシップ関数



②制御規則

		前件部変数－2				
		DV	DS	NU	IS	IV
前件部	DV	NB	NB	NB	NS	ZO
	DS	NB	NS	NS	ZO	ZO
	NU	NB	NS	ZO	PS	PB
	IS	ZO	ZO	PS	PS	PB
	IV	ZO	PS	PB	PB	PB
	1					

5. ファジィ制御の適用結果

前述した制御モデルを用いTダムで平成5年9月にオンライン取得されたデータを対象に制御シミュレーションを実施し、現地操作員の操作と比較することにより適用性の検討を行うこととする。

対象としたTダムの流域面積は約720Km²、調整池の有効容量は約45万m³であり、出水時のダム操作はいわゆる予備放流方式で操作される3類のダムである。

図－2には現地でオンライン取得したダム操作員の実操作結果を示す。

図－3～5にはそれぞれ目標放流量の計算式を流入量基本式、放流量基本式、流入量基本式改良型の3ケースの制御モデルを用いてシミュレーションを行った結果得られた貯水池水位を示す。なお、図中に示した階段状の線は制御の目標水位を示しており、現地操作員の設定方法を参考に決定した。

制御モデルを適用するにあたって使用したメンバーシップ関数の具体的な値を4章で示した記号を用いて以下に示す。

①水位偏差補正に係わる変数αを推論するための関数形

前件部変数		後件部変数α
水位偏差及び水位偏差の変動(cm)	流入量変化率(%)	CN3=-1、CN2=-2/3、CN1=-1/3 CP1=1/3、CP2= 2/3、CP3= 1
N3=-9、N2=-6、N1=-3 P1= 3、P2= 6、P3= 9	QN2=-5.0、QN1=-2.5 QP1= 2.5、QP2= 5.0	

②流入量変化に係わる変数 β を推論するための関数形

前件部変数（流入量変化率、 流入量変化率の変動(cm^3/s)）
QN2=-50、QN1=-25、QP1=25、QP2=50

後件部変数 β
CN2= -1、CN1=-1/2 CP1= 1/2、CP2= 1

なお、シミュレーションではゲート操作の間隔は現地と同様に10分とし、目標放流量の算出タイミングはゲート操作開始1分前とした。

流入量基本式と流入量基本式改良型を用い制御シミュレーションを行った結果（図-3、図-5）では、現地操作員の制御と比較しても大差の無い良好な制御結果となっている。しかし、放流量基本式を用い制御シミュレーションを行った結果（図-4）では目標放流量の算定が放流量を基本としているため、流入量の勾配が変化するところで、制御遅れとなり水位が定水位に保たれず、その結果周期が約3時間、振幅10cm程度のゆっくりとした振動が見受けられる結果となっている。なお、ここで言う良好な制御とは、制御の結果水位が目標水位に良く追従すること、現実の操作と違和感がないこと（水位が目標水位に維持されていても、ゲートのハンチング状態がしばしば生じる操作は良好な制御とは言い難い）等を言う。

図-6にはダム操作員が操作を行った結果得られた7時～19時の全放流量と流入量基本式を用いた制御シミュレーションの結果得られた全放流量を比較して示す。この放流量の比較を見ても制御シミュレーションの結果と操作員の操作結果に大差の無いことが分かる。

ここに示した制御シミュレーションでは目標放流量の算出タイミングをゲート操作開始の1分前としたが、これは操作開始直前の情報に基づいて目標放流量の算定を行うことにより、より適切な変化傾向を把握することを目的とした。

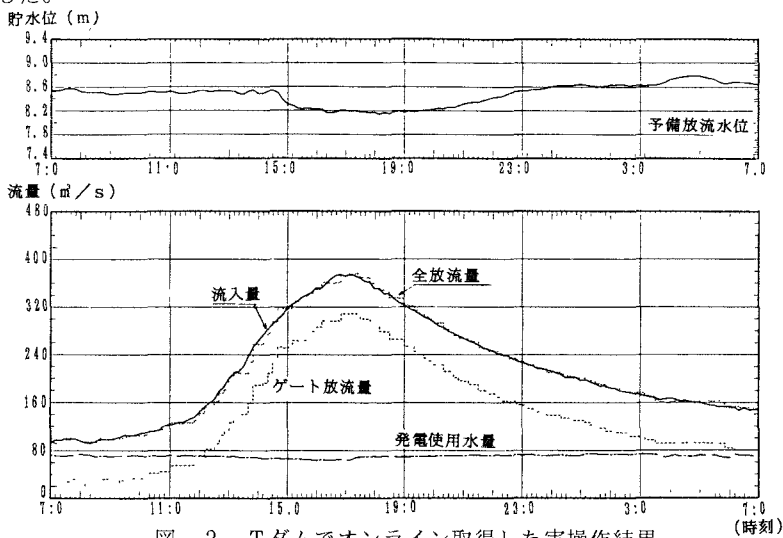


図-2 Tダムでオンライン取得した実操作結果

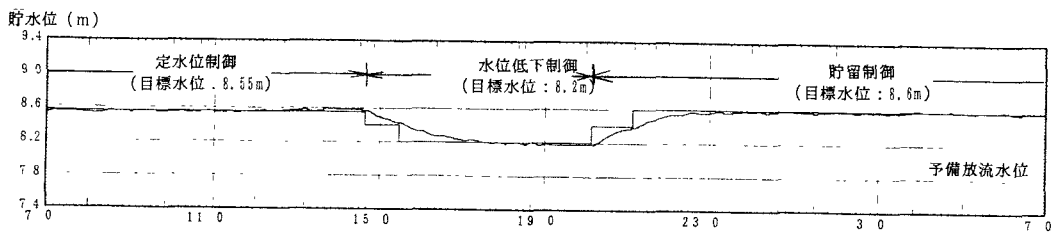


図-3 流入量基本式を用いた水位制御結果

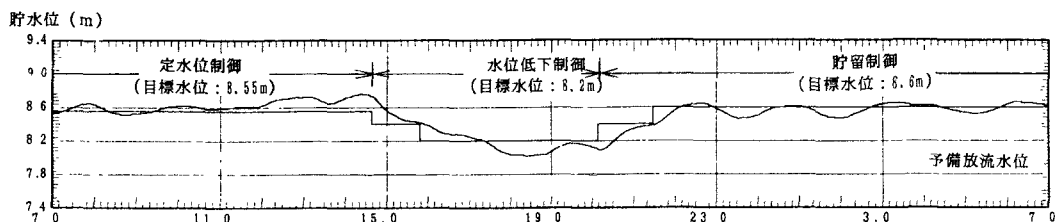


図-4 放流量基本式を用いた水位制御結果

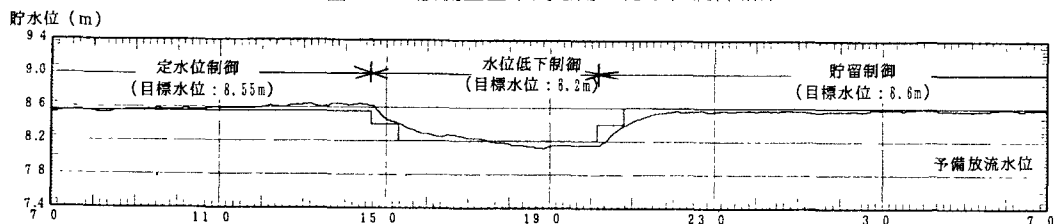


図-5 流入量基本式改良型を用いた水位制御結果

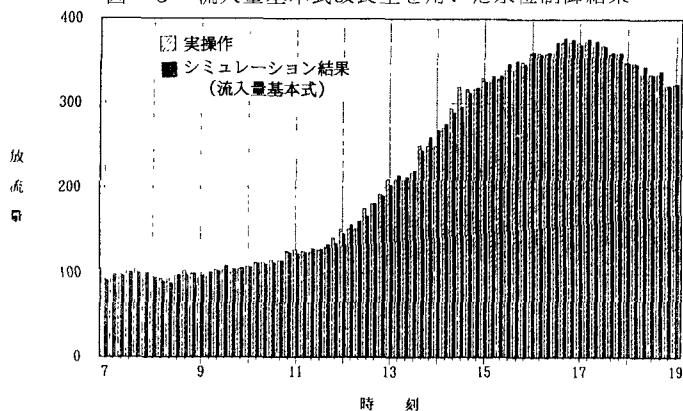


図-6 実操作と流入量基本式モデルによる放流量の比較

6. あとがき

本研究では目標放流量の計算式として流入量基本式、放流量基本式、流入量基本式改良型の3式を設定し、ファジィ制御規則の構築を行った。その結果流入量基本式およびその改良型を用いた制御モデルを使うとダム操作員の操作と大差のない水位制御を行うことが出来た。今後、さらに現地データ収集し、種々の洪水パターンによる検討を行うことによりさらに信頼性の高い制御モデルの構築をすすめていく予定である。なお、本研究を遂行するにあたって助言をいただいた京都大学防災研究所榎葉充晴教授に謝意を表す。また、(株)ユニック西田壽夫大阪事務所長の協力を得たことを付記し謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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、水工学論文集、第34巻、pp.601-606、1990.
- 2) 高嶋紀義、鈴木一広、荒巻俊秀：ダム操作支援システムの開発について、電力上木、No.229、1990.
- 3) 山本純也、勝田栄作、陳活雄、北山和典、土方三男：ダムゲート操作へのファジィ制御の適用、水文・水資源学会1993年研究発表会要旨集、pp.102-105、1993.
- 4) 水本雅晴：最近のファジィ制御法、数理科学3、pp.20-26、サイエンス社、1991.