

## 茨戸川流域水門操作支援 Fuzzy システム

### *Fuzzy Support System for Gate Operations in the Barato River Basin*

橋本謙秀\* 是枝伸和\*\* 星 清\*\*\*

By Norihide HASHIMOTO, Nobukazu KOREEDA and Kiyoshi HOSHI

*The Barato River basin, located in the northern part of Sapporo City, is characterized by low-lying areas. The prevention and mitigation of flood damages in this basin are mainly controlled by the two gates; the gate of Shibi canal plays an important role in shutting off the backwater effect of the Ishikari River, while the gate of Ishikari Floodway draining out the inflow volumes from three upstream tributaries of the Barato River as fast as possible.*

*The current gate operations in the Barato River system are heavily relied on intuition of the experienced engineers, mainly because decision-makings should be done on complicated predictions of inflows to the Barato River, water levels of Ishikari and Barato Rivers and the tide in a river mouth.*

*The present study describes the basic concept of a Fuzzy support system applied to gate operations of the Barato River basin and some simulation results.*

*Keywords: Fuzzy inference, runoff prediction, expert system, gate control*

#### 1. まえがき

道都札幌市の北部に位置する茨戸川流域の洪水被害を防止することを目的として、昭和57年に石狩放水路が完成し、昭和62年4月と5月の2回、洪水被害防止のため開門操作が行われている。この水門操作は、原則的には操作実施要領により行われるが、現実的に開閉の判断を下す場合には、長年の専門家（エキスパート）の経験的感が必要とされている。

本研究は、Fuzzy 推論を適用して、この専門家の経験的判断をシステムに組み込んだ水門操作支援システムを確立する事を目的として検討を行ったものである。

#### 2. 茨戸川流域の水文特性

茨戸川は札幌市の北部に位置し、生振捷水路、当別捷水路によって石狩川本流から切り離された流域約 160 km<sup>2</sup> 延長約 20 km、平均巾約 200 m の三ヶ月湖であり、伏竜川、創成川、発寒川の3支川を流入して人工の志美運河を通して石狩本川へと流下している。この流域は低平で、石狩川の背水の影響は3支川までおよび、排水条件が悪く、幾度かの浸水被害を生じている。そのため、この流域からの洪水を直接石狩湾へ排出し、浸水被害を防ぐ事を目的として、石狩放水路が建設され現在に至っている（図-1参照）。

\* 正会員 北海道開発局 建設部 河川計画課（〒060 札幌市北区北8条西2丁目）

\*\* 正会員 工修 建設技術研究所 河川計画本部 東京本社技術第5部

（〒103 東京都中央区日本橋本町4-9-11）

\*\*\* 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 水工部（〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目）

### 3. 茨戸川流域水門操作支援 Fuzzy システム全体構成

石狩放水路の操作方法は、「石狩川水系・石狩放水路水門操作規則(案)」および「石狩川水系・石狩放水路水門操作実施要領(案)」によって規定されているが、実際に水門を操作する場合は、「石狩川本川の水位状況」、「茨戸内支川流入量」、「石狩湾の潮位」、「操作の頻度」等判断要因が多く、「水門操作実施要領(案)」等にかかかれている事項だけでは操作の判断を下せないのが現状である。すなわち、「石狩川本川水位・茨戸水位があと何時間程度で操作すべき水位になるか」

「茨戸川内の降雨がどの程度茨戸水位に影響をおよぼすのか」

「操作を行って次の操作を行うのに間隔が短かすぎないか」

「水門閉鎖水位を越えるのが何時間程度であればこのまま閉鎖しない方が望ましいか」

等、非常にあいまいで、不確実性を有しているものであり、専門家(エキスパート)の長年の経験からくる感みたいな判断で操作を行わざるをえない状況である。また、次のような問題も指摘されている。

イ、石狩川本川の出水のうち、融雪出水が多くを占めるため、融雪出水にも対応しうる本川水位予測が必要であるが、流域が大きく、従来の融雪流出計算による予測手法では問題が多い。(精度、モデルの簡易性、予測計算時間等)

ロ、茨戸川(3支川を含む)の水位観測所は、いずれも石狩川の背水の影響を受けており、かつ、1~2cmの程度の誤差でも流入量に換算すると20~30m<sup>3</sup>/sに相当するため、洪水時の実績流入量を把握するのが非常に困難である。そのため、従来の流出計算における定数を決定することが困難である。

ハ、実際に水門を管理する職員は2~3年程度で変わるため、経験から得られる操作の感を得るのが困難である。

以上のような状況のもと、比較的簡易で予測精度が高く、かつ専門家の判断等も組み込む事が可能な水門操作の支援システムの作成が望まれている。

本研究は、上記のような要望を満足させるシステムとして、Fuzzy 推論を適用した水門操作支援システムを検討したものである。

本システムの全体構成は図-2に示すように次の5つのサブシステムから構成されている。

- ① 入力情報処理サブシステム
- ② 石狩川水位予測サブシステム
- ③ 茨戸川水位予測サブシステム
- ④ 潮位予測サブシステム
- ⑤ 運河・放水路水門操作サブシステム

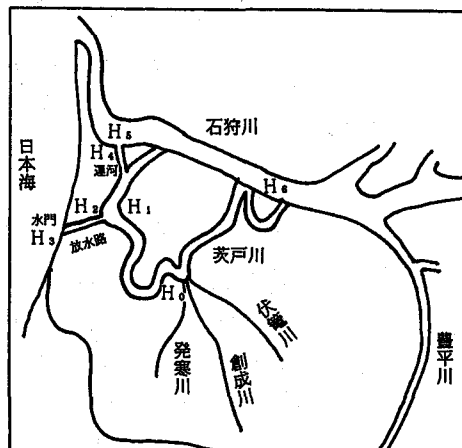


図-1 流域図

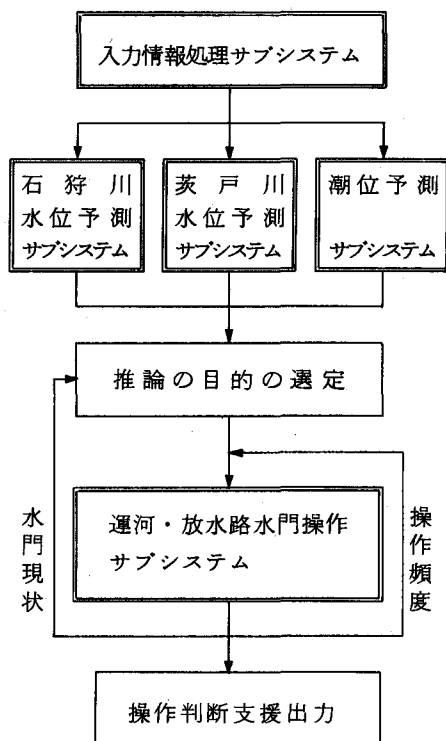


図-2 システム全体フロー図

### 3・1 入力情報処理サブシステム

当サブシステムでは、本システム上必要な水位、降雨、潮位等の観測記録を収集し、以下の処理を実施する。

- ① 入力データの平滑化 (Fuzzy推論)
- ② 異常値の判断・修正
- ③ 欠測値の処理

### 3・2 石狩川水位予測

水門操作判断における重要な要因となる石狩川本川 ( 荻戸川合流地点:  $H_5$  ) の水位を予測する。

#### ① Fuzzy本川水位予測

本川 ( 荻戸川合流地点 ) 水位  $H_{5,t}$ 、 $\Delta H_{5,t}$ 、 $\Delta^2 H_{5,t}$  および上流水位観測所  $H_{6,t}$  を用いて Fuzzy 推論により  $\Delta H_{5,t+1}$  を予測する。 ( $H_{5,t+1} = H_{5,t} + \Delta H_{5,t+1}$ )

ここで、 $\Delta H_t = H_t - H_{t-1}$ 、 $\Delta^2 H_t = \Delta H_t - \Delta H_{t-1}$

#### ② Fuzzy自己調整 (FLC)

予測結果  $H_{5,t+1}$  と  $t+1$  時刻に得られた実績記録  $H'_{5,t+1}$  との適合性を勘案して、予測結果  $H_{5,t+2}$  を  $t+2$  時刻にわかる実績記録に近づけるため Fuzzy 推論により予測結果を調整する。

$H_{5,t+2} = H_{5,t+2} + DH$  ( $DH$  は調整量)

### 3・3 荻戸川水位予測サブシステム

3・2と同様水門操作判断において重要な要因である荻戸川 ( 荻戸地点:  $H_0$  ) の水位を予測する。

#### ① Fuzzy荻戸水位予測

放水路水門の開度別に、荻戸水位  $H_{0,t}$ 、 $\Delta H_{0,t}$ 、 $\Delta^2 H_{0,t}$ 、荻戸内降雨  $R$  を用いて Fuzzy 推論により  $\Delta H_{0,t+1}$  を予測する。 ( $H_{0,t+1} = H_{0,t} + \Delta H_{0,t+1}$ )

#### ② Fuzzy自己調整 (FLC)

予測結果  $H_{0,t+1}$  と  $t+1$  時刻に得られた実績記録  $H'_{0,t+1}$  との適合性を勘案して、予測結果  $H_{0,t+2}$  を  $t+2$  時刻にわかる実績記録に近づけるため Fuzzy 推論により予測結果を調整する。

( $H_{0,t+2} = H_{0,t+2} + DH$ )

なお、このサブシステムは運河水門が閉鎖している場合に予測するもので、運河水門が開いている場合は、荻戸水位  $H_0$  ÷ 本川水位  $H_5$  となり 3・2 の予測結果を使用する事になる。

### 3・4 潮位予測サブシステム

放水路水門が開いている場合の放流先である石狩湾新港 ( 放水路水門下流:  $H_3$  ) の潮位を予測する。

石狩湾新港潮位  $H_3 = f(\text{小樽潮位})$

小樽潮位 = 天文潮 + 気象潮 = 小樽潮位表潮位 + 小樽潮位偏差

潮位偏差は実績潮位、潮位表天文潮、気圧、風速、主風向による重回帰分析により回帰式を作成した。

### 3・5 運河・放水路水門操作サブシステム

上記 3・2～3・4 の予測結果および操作の頻度情報等を用いて、次の 4 つの目的別にエキスパートが判断する過程を Fuzzy 推論により再現し、運河・放水路水門の操作判断を支援するサブシステムである。

- ① 運河水門閉鎖判断推論 : 運河水門が開いている時に、閉門するかどうかの判断を推論する。
- ② 放水路水門開門判断推論 : 運河・放水路ともに閉じている時に、放水路水門を開門するかどうかの判断を推論する。
- ③ 放水路水門開度設定推論 : 放水路水門を開けるかの判断、もしくは開度をいくにするかの判断を推論する。
- ④ 運河水門開門判断推論 : 運河水門を開けるかどうかの判断を推論する。

本論文では、3・1の入力情報の平滑化、3・2の石狩川水位予測サブシステムについて紹介する。

#### 4. 入力情報（水位）の平滑化処理

現時刻水位が図-3の○（ $H_t$ ）と観測されたとする。

- ・ この現時刻より今後水位が下がっていくのか？
- ・ この観測値がおかしくて実際はもう少し上か？

は、観測水位自体に高い精度を有していないため、次のステップが来るまで正確には分からない。

そのため、何らかの手法で観測水位の平滑化処理を行った方が望ましく、通常は移動平均法やカルマンフィルタ法等により平滑化処理をされている例が多い。

移動平均法では、波形が遅れる傾向にあり、カルマンフィルタ法では、やや長いうねりみtainな現象も平滑化してしまう懸念がある。本研究では、以下に示すようなFuzzy推論を応用した平滑法を検討した。

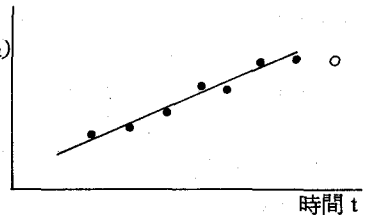


図-3 水位の平滑化

##### ① 使用変数（前件部）

- $\Delta H_t$  水位変化量（ $H_t - H_{t-1}$ ）  
 $\Delta H_{t-1}$  水位変化量（ $H_{t-1} - H_{t-2}$ ）  
 $\Delta H_{t-2}$  水位変化量（ $H_{t-2} - H_{t-3}$ ）

##### ② 目的変数（後件部）

$H = H + DH$  として  $DH$  を目的量とする。  
（ $DH$ ：観測値の修正量）

##### ③ 推論構成（Fuzzy推論）

IF  $\Delta H_{t-2}$  is A and  $\Delta H_{t-1}$  is B and  $\Delta H_t$  is C THEN  $DH$  is D

##### ④ 変数の空間分割（表-1）

表-1 前、後件部変数の空間分割

| 前件部変数<br>(A, B, C) |        | 後件部変数<br>(D) |        |
|--------------------|--------|--------------|--------|
| PB                 | 正で大きい  | PB           | かなり増やす |
| PS                 | 正で小さい  | PS           | やや増やす  |
| ZE                 | ほとんどゼロ | ZE           | 変えない   |
| NS                 | 負で小さい  | NS           | やや減らす  |
| NB                 | 負で大きい  | NB           | かなり減らす |

##### ⑤ 推論ルール（表-2）

表-2 推論ルール

| ルール | $\Delta H_{t-2}(A)$ | $\Delta H_{t-1}(B)$ | $\Delta H_t(C)$ | $DH(D)$ |
|-----|---------------------|---------------------|-----------------|---------|
| 1   | PB                  | PB                  | NS              | PS      |
| 2   | PB                  | PB                  | NB              | PB      |
| 3   | ZE                  | ZE                  | PB              | NS      |
| 4   | ZE                  | ZE                  | NB              | PS      |
| 5   | NB                  | NB                  | PS              | NS      |
| 6   | NB                  | NB                  | PB              | NB      |
| 7   | PB                  | NB                  | PB              | NS      |
| 8   | NB                  | PB                  | NB              | PS      |
| 9   | PS                  | PS                  | PS              | ZE      |
| 10  | ZE                  | ZE                  | ZE              | ZE      |
| 11  | NS                  | NS                  | NS              | ZE      |

#### 5. 石狩川水位予測サブシステム

##### 5・1 石狩川水位予測

近年、水工学の分野における制御や予測に

Fuzzy推論が広範に用いられ、その有効性が確認されつつある。<sup>1)~7)</sup> Fuzzy推論を用いた水文情報の予測としては、藤田<sup>1)~4)</sup> が小流域を対象として降雨量  $R_t$  と水位変動  $\Delta H_t$  を用いて

$$\Delta H_{t+1} = f \{ R_t, \Delta H_t \}$$

$$H_{t+1} = H_t + \Delta H_{t+1}$$

なる推論を提案している。しかし、本システムにおける対象流域は石狩川と大流域であり、かつ、融雪洪水も対象としているため、 $\Delta H$ の変動要因となる  $R_t$  を変数として選定するのは得策ではない。

本研究では  $\Delta H_5$  の変動要因として  $\Delta^2 H_5$  および上流（予測時間分の到達時間がある観測所）の水位変化量  $\Delta H_6$  を考え、かつ、河道の状況を考慮して  $H_5$  も考慮して次のような推論形式とした。

$$\Delta H_{5,t+1} = f \{ H_{5,t}, \Delta H_{5,t}, \Delta H_{6,t}, \Delta^2 H_{5,t} \}$$

$$H_{5,t+1} = H_{5,t} + \Delta H_{5,t+1}$$

IF  $H_{5,t}$  is A and  $\Delta H_{5,t}$  is B and  $\Delta H_{6,t}$  is C and  $\Delta^2 H_{5,t}$  is D then  $\Delta H_{5,t+1}$  is E

IF  $H_{5,t}$  is A' and  $\Delta H_{5,t}$  is B' and  $\Delta H_{6,t}$  is C' and  $\Delta^2 H_{5,t}$  is D' then  $\Delta H_{5,t+1}$  is E'

この推論の思想は、「現時点の状況 ( $H_5, \Delta H_5, \Delta H_6, \Delta^2 H_5$ ) が、過去のある時点の状況と等しければ、1ステップ先の予測水位上昇 ( $\Delta H_5$ ) は、過去のある時点の1ステップ先(既知)と等しくなる」すなわち、現時点の状況 ( $H_5, \Delta H_5, \Delta H_6, \Delta^2 H_5$ ) を、過去の多くの時点の状況と比較し、その類似度合に応じて現時点プラス1ステップ先を予測するものである。

5・2 Fuzzy自己調整 (FLC)

(a) Fuzzy自己調整 (FLC)

FLCとは、自己調整ファジィ制御装置の事で、5・1によって予測された $\Delta H$ は、次のステップが来るとその予測誤差がわかってしまう。すなわち、

$$e = H' - H$$

ここで、 $e$ : 誤差  $H'$ : 実測値  $H$ : 1ステップ前に予測した値

この誤差を修正するために、制御工学でよく知られている自己調整装置をFuzzy化したのがFLCである。この自己調整ファジィ制御装置は、ある程度の制御知識を与えておくと、制御結果あるいは制御の途中結果から、学習則によってスケーリングファクター(メンバーシップ関数)の調整と制御ルールの結論部を修正して、制御則の再編成を行う。

本研究では、2つの調整装置のうち、得られた予測値の精度や電算容量、時間等を考慮して、後者のルールの結論部の修正により予測値を修正する事とした。

(b) ルールの修正

予測値 $H$ と時間経過後にわかる実績値 $H'$ との誤差が、各ステップで計測される。

$$e_t = H'_t - H_t$$

さらに、この誤差の変化率は、

$$\Delta e_t = e_t - e_{t-1}$$

となり、これが各ステップ記録される。

この $e$ と $\Delta e$ との関係より、

IF  $e$  is  $A$  and  $\Delta e$  is  $B$   
THEN  $\Delta b$  is  $C$

( $\Delta b$  は予測値の修正量)

なるルールが構成される。 $A, B, C$ の関係すなわち修正推論ルールは、表-3のように規定した。

※ピーク時には、調節することにより逆に誤差が大きくなる場合が生じるため、 $e_t, e_{t-1}$ の符号が逆転する時に限って表-3( )の予測値修正量を適用した。

表-3 予測値の修正規則

|     | 誤 差   |              | 予測値修正量     |                          |
|-----|-------|--------------|------------|--------------------------|
|     | $e_t$ | $\Delta e_t$ | $\Delta b$ |                          |
| (1) | P     | P            | NB(PB)     | P : 正<br>Z : ゼロ<br>N : 負 |
| (2) | P     | Z            | NM         |                          |
| (3) | P     | N            | NS         | NB : かなり減らす              |
| (4) | Z     | P            | NS(PS)     | NM : やや減らす               |
| (5) | Z     | Z            | ZE         | NS : 少し減らす               |
| (6) | Z     | N            | PS(NS)     | ZE : 不変                  |
| (7) | N     | P            | PS         | PS : 少し増す                |
| (8) | N     | Z            | PM         | PM : やや増す                |
| (9) | N     | N            | PB(NB)     | PB : かなり増す               |

6. 適 用

開発したシステムを既往11洪水例について適用し推論を実行した。ここでは昭和63年5月洪水について結果を図-4(データの平滑化)、図-5(石狩川水位予測および自己調整後: 1時間予測)に示した。

これより、平滑化処理は通常人間が線を引く程度のレベルまで平滑化されていると考えられる。また水位予測結果としては全般的にやや遅れる傾向が見られる。さらに、自己調整をかけると同じ水位変動傾向(上昇、下降)にある時はかなり実績値に近く修正されるものの、水位変動変化時(ピーク時等)には十分に修正されていない。今後は、水位予測、自己調整の精度向上、長時間(3~10時間程度)の予測方法の検討、水門操作システムの確立等を実施して実用化を高めたい。

昭和63年 5月 1日 洪水

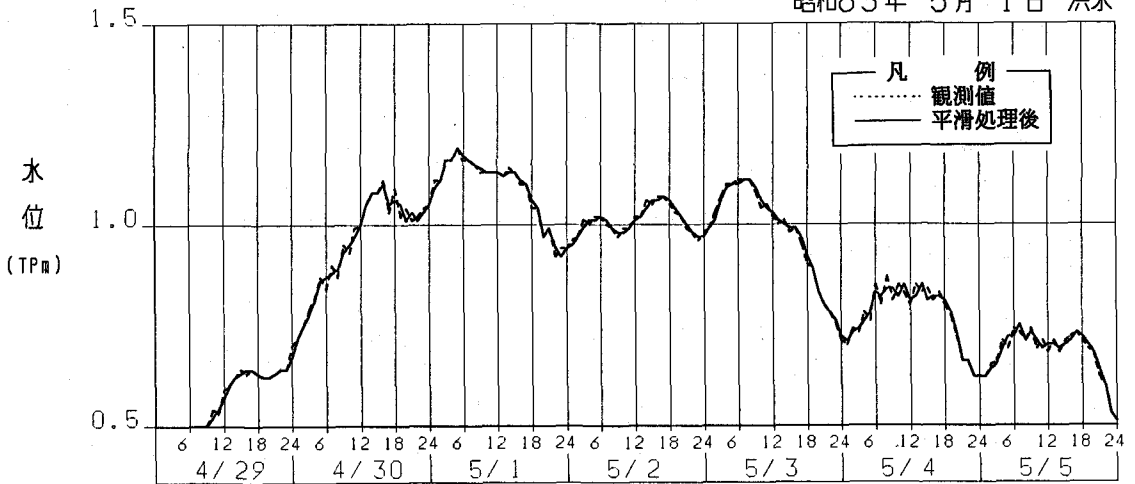


図-4 入力情報(水位)の平滑化处理

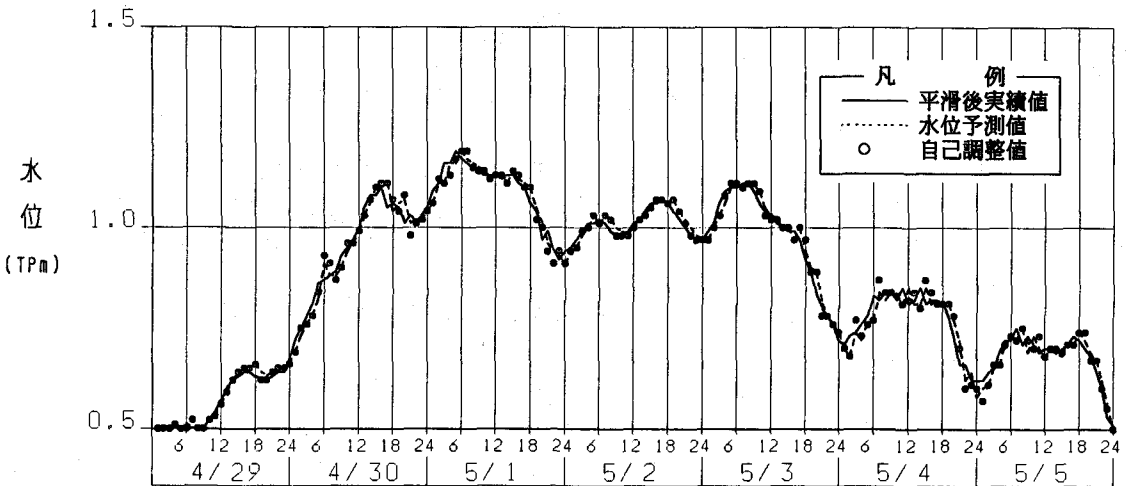


図-5 石狩本川水位予測結果

#### 参考文献

- 1) 藤田 睦博: Fuzzy集合理論の流出予測問題への応用、第29回水理講演会論文集、pp. 263~268、1985
- 2) 藤田 睦博: Fuzzy理論と流出予測、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp. 164~167、1988
- 3) 藤田 睦博・早川 博: 流出予測におけるあいまいな推論法の比較について、水文・水資源学会研究発表会要旨集、pp. 103~106、1989
- 4) 藤田 睦博・早川 博: ファジィ推論を用いた水文情報サービスの利用に関する研究、水工学論文集、第34巻、pp. 589~594、1990
- 5) 小尻 利治・池淵 周一・十合 貴弘: ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究、京都大学防災研究所年報 第30号、pp. 323~339、1987
- 6) 小尻 利治・藤井 忠道: 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
- 7) 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、土木学会第44回年次学術講演会概要集、pp. 162~163、1989