

## 不定流解析を用いた頭首工ゲート操作の検討

(株) アルファ技研 ○高橋 洋  
寒地土木研究所 中村和正

### 1. はじめに

農業用の頭首工におけるゲート操作は、管理規程に準拠して行われる。河川水位の調整や灌漑終了時の落水操作の際に、頭首工ゲートを操作して放流量を変化させる場合は、下流河川の狭小断面等の流下能力に基づいて定められた水位上昇の限度を超えない操作とすることが管理規程に規定される。この条件に適うゲート操作方法は、現地実証あるいは不定流解析で検討できる。

現地実証の場合、狭小断面地点等の複数箇所を水位観測点とし、幾通りかのゲート操作を行って水位変化を調べ、各観測点の水位上昇が限度以内となるゲート操作方法を検証する。実際の現象に基づいていることは長所であるが、試みることのできるゲート操作回数には限りがあり、また、水位観測地点以外の水位上昇速度を検証することはできない。

一方、不定流解析の場合は、下流河川の任意の地点を設定して水位を算定できるため、計算モデルの適合性が高ければ、水位上昇速度の最も大きい地点の推定などに有効となる。また、ゲート操作方法はパラメータの変更で容易に選択できるため、たとえば、灌漑終了時の落水作業を短縮するためのゲート操作方法を検討することもできる。ただし、実態に合う計算モデルの構築には、現地実証等の結果を用いたモデルの検証が重要である。

著者らは、A頭首工を検討対象として、不定流解析によるゲート操作方法の検討を行った。本報告では、灌漑終了時の頭首工落水操作を想定し、現地実証の水位観測記録を用いたモデルの検証とゲート操作方法の検討事例を紹介する。

### 2. 不定流解析手法<sup>1)</sup>

#### 2.1 不定流の基礎式

不定流は、(1) 式の運動方程式と (2) 式の連続方程式で表現される。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + S + \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} = 0 \quad \dots \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 $t$ : 時間 (s) 、 $x$ : 距離 (m) 、 $v$ : 流速 (m/s) 、 $h$ : 水深 (m) 、 $S$ : 水路勾配、 $n$ : マニングの粗度係数、 $R$ : 径深 (m) 、 $A$ : 通水断面積 (m<sup>2</sup>) 、 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s) 、 $q$ : 単位幅あたりの横流入量 (m<sup>2</sup>/s) 、 $g$ : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>) である。

不定流解析では、運動方程式より流速を求め、連続方程式より水位を求める。

#### 2.2 差分法による不定流解析

本報告では、不定流解析は差分法による方法を用い、基礎式を差分式に変形して計算を行う。

不定流解析にあたり、図 1 に示す演算格子を設定する。ここに、 $\Delta x$ : 水路沿いの刻み幅 (m) 、 $\Delta t$ : 時間刻み幅 (s) 、 $i$ : 距離の格子番号、 $d$ : 時間の格子番号である。 $i$  は、番号の小さい方を下流に、番号の大きいほうを上流に設定する。

演算格子の構成は、流速点と水位点を、それぞれ  $\Delta t/2$ 、 $\Delta x/2$  ずつずらした千鳥状配置からなって

いる。なお、流速点は  $i$  の奇数番号に配置し、水位点は偶数番号に配置する。

演算は以下の手順で行う。

- ①  $t=t_0$ における流速条件（既知流速）より、全流速点 ( $i$  の奇数番号) の流量を求める。
  - ② ①で求めた流量を  $\Delta t$  時間だけ継続させて、連続方程式より、 $t=t_0+\Delta t/2$  における全水位点 ( $i$  の偶数番号) の水位を下流端から上流端にかけて求める。
  - ③ 上記で計算した水位を  $\Delta t$  だけ継続させて、運動方程式より、 $t=t_0+\Delta t$  における全流速点 ( $i$  の奇数番号) の流速を下流端から上流端にかけて求める。
  - ④ 以上の計算を、解析が必要な時間まで繰り返し行う。
- (1) 運動方程式の差分
- 流速点の流速は、運動方程式の差分式より計算する。
- (1) 式の運動方程式を差分式に変形すると、(3) 式となる。
- ここに、 $z$ ：水路底標高 (m)、その他の記号は前述のとおりである。
- 求めたい流速点を図 2 の  $dV_i$  とすると、 $dV_i$  は既知の水位点 2 点および流速点 3 点より求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \frac{dV_i - dV_{i-2}}{\Delta t} + \frac{1}{2g} \frac{d-2V_{i+2}^2 - d-2V_{i-2}^2}{2\Delta x} + \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{\Delta x} + \frac{d-1 h_{i+1} + d-1 h_{i-1}}{2} \\ + \frac{n^2 |d-2V_i|}{\left(\frac{R_{i+1} + R_{i-1}}{2}\right)^{4/3}} = 0 \quad \dots \quad (3) \end{aligned}$$

## (2) 連続方程式の差分

水位点の水位は、連続方程式の差分式より計算する。

- (2) 式の連続方程式を差分式に変形すると、(4) 式となる。

ここに、 $W$ ：水路幅 (m)、その他の記号は前述のとおりである。

求めたい水位点を図 3 の  $dh_i$  とすると、 $dh_i$  は既知の流速点 2 点および水位点 3 点より求めることができる。

$$\frac{1}{4} \left( 3W_i + \frac{W_{i-2} + W_{i+2}}{2} \right) \frac{dh_i - dh_{i-2}}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{A_i + A_{i+2}}{2} V_{i+1} - \frac{A_{i-2} + A_i}{2} V_{i-1} \right) = q \quad \dots \quad (4)$$

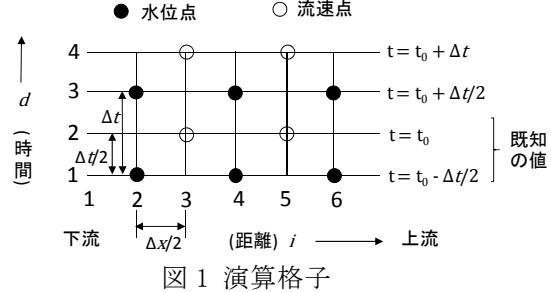


図 1 演算格子

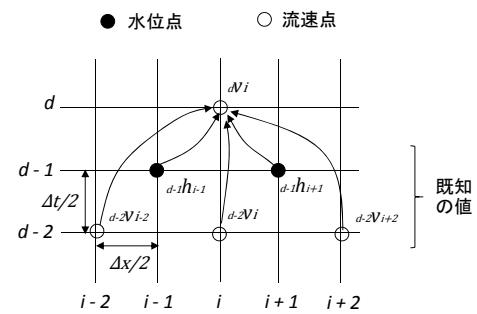


図 2 運動方程式の差分

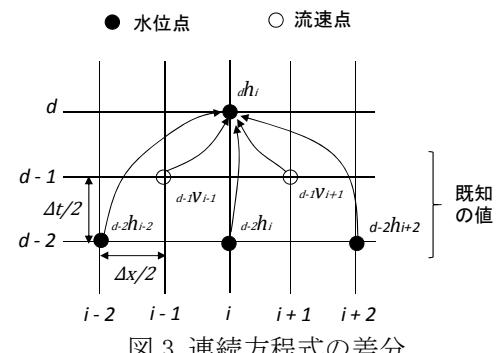


図 3 連続方程式の差分

## 3. 対象地点における不定流解析モデル化の条件

### 3.1 対象区間

不定流解析の対象区間は、B 川の D 観測所から C 川との合流地点までの 28.9km とした。E 観測所、A 頭首工、D 観測所はそれぞれ合流地点から 10.8km、20.9km、28.9km の位置である。D 観測所から A 頭首工の区間を対象とし

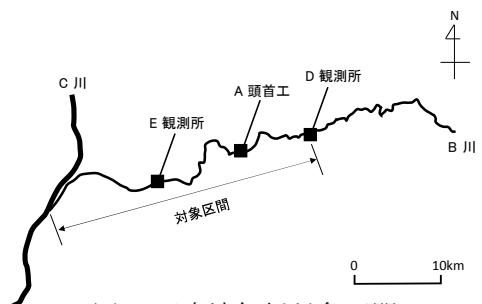


図 4 不定流解析対象区間

たのは、頭首工上流側の河道内における貯留水量の変化を計算するためである。E 観測所およびD 観測所では、水位が1時間毎に観測されている。また、両地点とも2013年までは流量が観測されていた。

### 3.2 A頭首工ゲートの概要

#### 3.2.1 ゲート諸元

A頭首工には洪水吐ゲートが1門設置されており、洪水吐ゲートはフラップゲートおよびローラーゲートから構成されている。フラップゲートおよびローラーゲートの諸元を表1に、概要を図5にそれぞれ示す。

表1 洪水吐ゲート諸元

設備名	形式	ゲート幅(m)	ゲート高(m)	ゲート開閉速度(m/min)
洪水吐ゲート	フラップゲート	23.0	1.2	0.30
	ローラーゲート	25.0	3.7	0.30

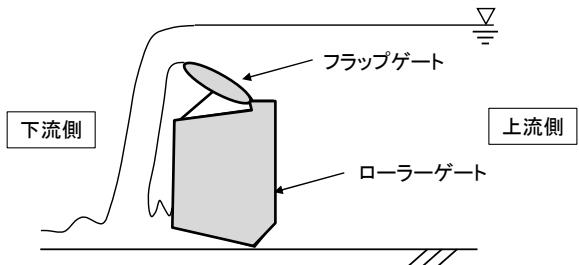


図5 洪水吐ゲート概要

#### 3.2.2 落水時のゲート操作

落水時は、フラップゲートを徐々に転倒させ、完全転倒した後にローラーゲートを段階的に引き上げる。

フラップゲートおよびローラーゲートからの放流量は、限度放流量(直前流量+増加限度量)以内を遵守することが求められている。直前流量は、前回ゲート操作時に設定開度となった際の流量であり、増加限度量は直前流量より決定する流量である。例えば、直前流量が $9.856\text{m}^3/\text{s}$ であった場合、表2より増加限度量は $1.638\text{m}^3/\text{s}$ である。従って、放流限度量は $11.494\text{ m}^3/\text{s}$ となる。

#### 3.3 不定流解析の条件

不定流解析のモデル図を図6に示す。図中の番号は格子番号を示しており、偶数番号が水位点であり、奇数番号が流速点である。なお、水位点間の距離は200mを標準とし、水理構造物等がある場所については、適宜調整した。流量境界の値は、現地実証日の0時からゲート操作前までのD観測所の平均流量と、ゲート操作前の放流量の流量比を求め、その後のD観測所の観測値に流量比を掛けた値とした。水位境界の値は、C川の観測所で実測されている水位より合流地点の水位を計算して用いた。

不定流解析にあたり、考慮した条件は下記の通りである。

##### ①区間流入

区間流入は、A頭首工からE観測所の間で8箇所、E観測所より下流に1箇所の計9箇所である。1箇所あたりの区間流入量は、現地実証日の0時からゲート操作前までのE観測所地点での平均流量から、現地実証日のゲート操作前の放流量を差し引き、それをA頭首工からE観測所の間の区間流入箇所数で割ることで求めた。

##### ②落差工

頭首工直下流と頭首工下流7.5kmに位置する全面魚道を落差工としてモデル化した。落差工地点の水深は限界水深とし、流速は限界流速とした。

##### ③魚道

A頭首工にはバイパス魚道が設置されている。実際と同様に、頭首工上流側の魚道出口からの流出水は、頭首工下流で再度B川に流入する設定とした。

表2 直前流量および増加限度量

直前流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	増加限度量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
9.756	1.638
9.921	1.669
10.072	1.699

#### ④ゲート放流量

フラップゲートからの放流量は、(5)式に示す全幅堰の公式<sup>2)</sup>より計算した。ここに、 $Q$ ：流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $C$ ：流量係数、 $B$ ：フラップゲート幅( $\text{m}$ )、 $h$ ：越流水深( $\text{m}$ )である。

ローラーゲートからの放流量は、ゲート下流水位がゲート下端標高よりも高い場合は、(6)式に示す潜り流出の式<sup>3)</sup>で計算した。一方、ゲート下流水位がゲート下端標高よりも低い場合は、(7)式に示す自由流出の式<sup>4)</sup>で計算した。ここに、 $Q$ ：流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $B$ ：ローラーゲート幅( $\text{m}$ )、 $g$ ：重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )、 $a$ ：ゲート開度( $\text{m}$ )、 $\Delta h$ ：水位差(上流水位-下流水位)( $\text{m}$ )、 $h_0$ ：上流水位( $\text{m}$ )である。

また、頭首工の上流水位および下流水位がゲート下端標高よりも低く、流れがゲートの影響を受けない河川流下となる場合は、ゲート地点の流量は2章で述べた差分式で計算した。

$$Q = CBh^{3/2} \quad \dots \quad (5)$$

$$Q = CaB\sqrt{2gh\Delta h} \quad \dots \quad (6)$$

$$Q = CaB\sqrt{2gh_0} \quad \dots \quad (7)$$

#### ⑤複断面

図7に示すような複断面水路の場合、高水敷は低水路と比較して、水深が浅く、流速が小さくなる。また、高水敷と低水路は、粗度係数も異なる場合が多い。不定流解析にあたり、このような複断面水路の粗度係数には複合粗度係数を用いた。各断面の粗度係数を用いて計算した流量と、全断面を单一断面として1つの粗度係数を用いて計算した流量が一致した場合、この粗度係数が複合粗度係数である。不定流解析では、ある時刻で求めた流量、通水断面積、潤辺から複合粗度係数を求め、それを $\Delta t$ 後の流速の計算に用いた。

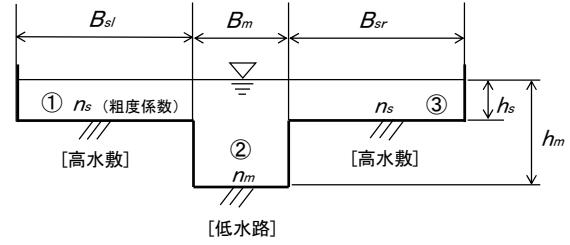


図7 複断面水路

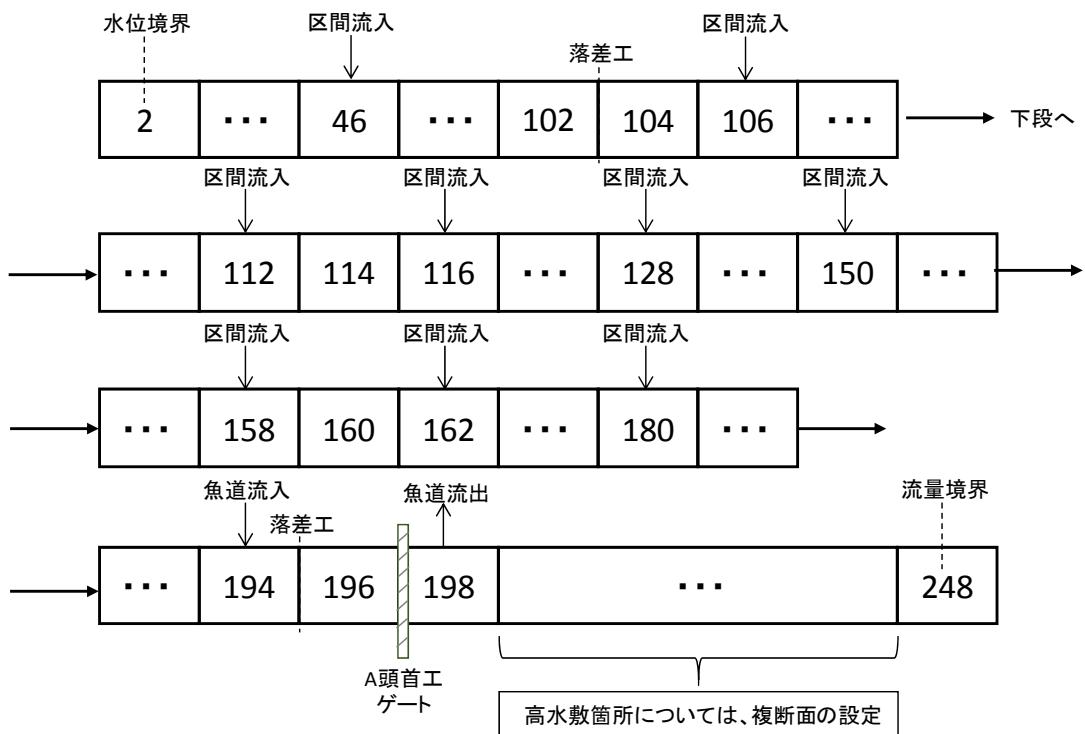


図6 不定流解析モデル図

## 4. 不定流解析結果

### 4.1 モデルの検証

平成 21 年および平成 23 年の現地実証時の水位の観測値と不定流解析の計算値の比較を行った。粗度係数は、河川の各区間の状態を表 3 の 1、2、3 のいずれかに判定して最小の  $n$  値を与えた。また、頭首工地点は側壁と底版がコンクリートのため、 $n$  値は 0.016 とした<sup>6)</sup>。

図 8、図 9 に E 観測所地点の観測値と不定流解析の計算値を示す。観測値と計算値は、概ね波形を一致させることができた。

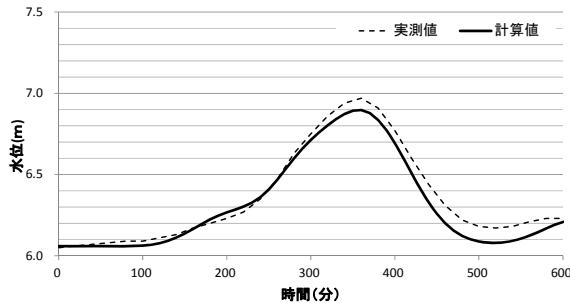


図 8 観測値と計算値の比較(平成 21 年の事例)

河道の材料と潤辺の状態 (自然河川の場合)	$n$ 値		
	最小	標準	最高
1 潤辺のきれいな直線河川で満水の状態砂州も深いふちもない	0.025	0.030	0.033
2 同上石があり、水草がある場合	0.030	0.035	0.040
3 潤辺のきれいな彎曲河川で多少深いふちや砂州のある場合	0.033	0.040	0.045

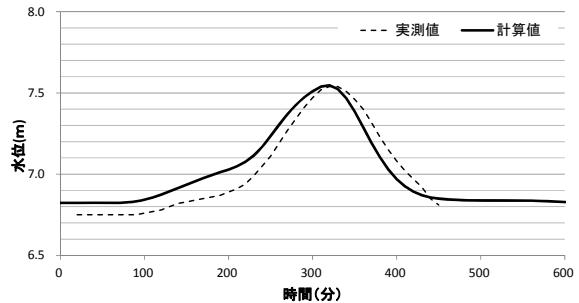


図 9 観測値と計算値の比較(平成 23 年の事例)

### 4.2 実測地点以外の水位

図 10 は、平成 23 年の現地実証を再現した際の、頭首工から下流 100m の地点における水位の計算値である。E 観測所地点の水位が滑らかに上昇しているのに対し、この地点の水位は、昇降を繰り返しながら徐々に水位が上昇している。これは、この地点が頭首工に近く、頭首工からの放流量の影響を受けるためだと考えられる。

図 11 は、不定流解析で計算したこの時のゲート放流量である。なお、この時の A 頭首工のゲート操作間隔は 20 分であった。ゲート放流量は、ゲート操作時に増加し、その後次回のゲート操作まで減少している。同様に、頭首工から下流 100m の地点の水位は、頭首工の放流量の増加とともに上昇し、減少とともに下降している。

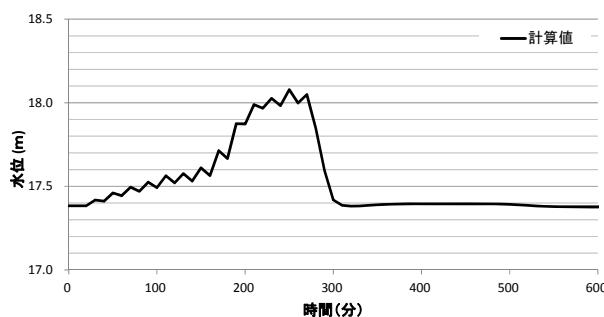


図 10 頭首工下流 100m 地点の水位(平成 23 年の事例)

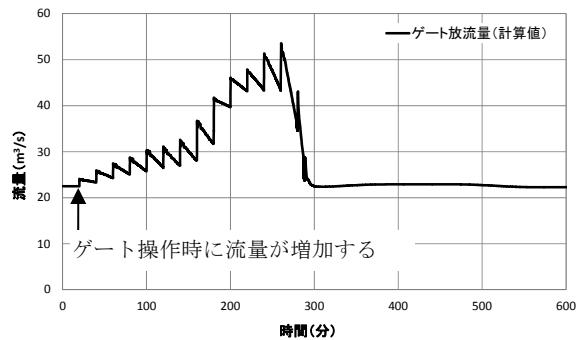


図 11 ゲート放流量

### 4.3 ゲート操作の検討

図 10 のような水位の昇降の繰り返しの中での水位の低下部分を水辺にいる者からみると、そのまま水位が低下するのか、それとも再度上昇に転じるのかが予測できない。水位上昇がより滑らかになるように、水位の昇降の繰り返しの幅を抑制できるゲート操作方法の検討を不定流解析で行った。

検討したゲート操作の条件は表 4 のとおりである。ゲート放流量の減少を抑えるために、ゲート操

作間隔を 20 分から 10 分に変更した。ゲート操作間隔を 1/2 にするのに伴って、フラップゲートと比較して流量が多いローラーゲートからの放流量は、直前流量に 1/2 増加限度量を加えた流量以内とした。

図 12 は頭首工から下流 100m の地点における水位の計算結果である。水位は滑らかに上昇しており、ゲート操作間隔を 10 分にした効果が現れている。

落水作業時間について、落水作業をゲート地点の流量が河川流量となるまでとした場合、平成 23 年の現地実証での落水作業時間は約 290 分である。一方、本検討条件では図 13 のとおり約 230 分であり、落水作業時間が約 60 分短縮される。

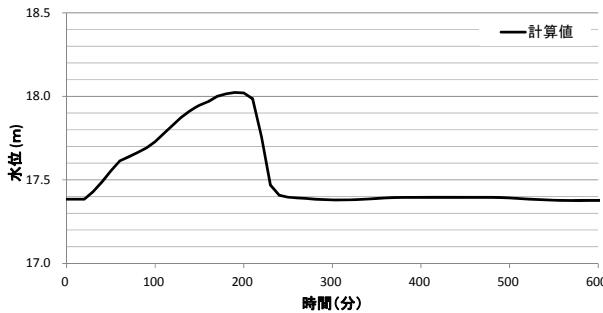


図 12 頭首工下流 100m 地点の水位

		ゲート操作間隔		放流量 (m³/s)	
		10分	20分	直前流量 + 増加限度量	直前流量 + 1/2増加限度量
検討条件	フラップゲート	○		○	
	ローラーゲート	○			○
現況条件	フラップゲート		○	○	
	ローラーゲート		○	○	

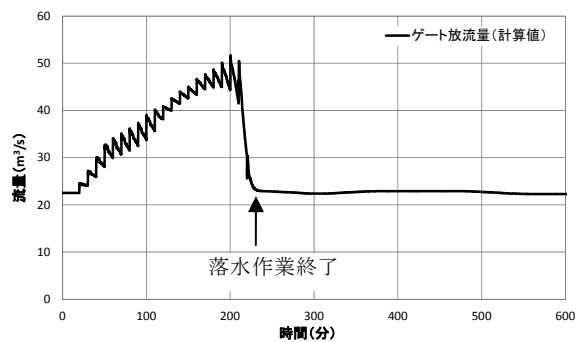


図 13 ゲート放流量

## 5.まとめ

本報告では、不定流解析を用いて、頭首工のゲート操作方法を検討した。一般に示されている粗度係数のうちの最小値を与えることで、観測水位を概ね再現することができた。また、不定流解析によって、水位観測地点以外の水位も推定することができ、これをもとに頭首工に近い下流区間での水位変化が滑らかになるようなゲート操作方法を検討できた。同時に、検討したゲート操作方法では、落水作業を約 60 分短縮できることが推察された。

本報告では、灌漑期間終了時のゲート操作方法の検討を行ったが、不定流解析を用いれば、大雨時のゲート操作についても検討可能である。今後、機会があればそのような検討も試みたい。

最後に、本研究を進めるにあたり、水位観測データを提供いただいた北海道開発局札幌開発建設部の関係各位に深く感謝申しあげます。

## 引用文献

- 白石英彦・中道宏編著：農業水利計画のための数理モデルシミュレーション手法－新たな広域水管理をめざして－，(社)土地改良技術情報センター, pp. 10-24 (1993)
- 土木学会水理公式集改訂委員会：水理公式集, (社)土木学会, p. 283 (1971)
- 白石英彦・中道宏編著：農業水利計画のための数理モデルシミュレーション手法－新たな広域水管理をめざして－，(社)土地改良技術情報センター, p. 148 (1993)
- 土木学会水理公式集改訂委員会：水理公式集, (社)土木学会, pp. 297-298 (1971)
- 山岡勲：河床の粗度について, 北海道開発局土木試験所月報 100 号, p. 9 (1961)
- 川上謙太郎：MANNING 流速公式の数表と水路の水理計算法, 理工図書(株), p. 44 (1965)