

## パソコンによる可変勾配開水路の流量制御に 関する研究 (Ⅱ)

—小流量の制御機能と過渡流れ下の水位制御のシミュレーション—

竹 山 光 一\*

---

Studies on the Flow Control System in Tilting Open Channel Flume by Personal Computer (II)

—The Control Function with Small Discharge and Simulation of  
Water Height Control in Hyaraulic Transient Flow—

Kouichi TAKEYAMA

---

This study was the function of discharge control system by personal computer and the mathematical simulation of water height control by automatic gate in hydraulic transient.

Here that computer was connected with electromagnetic flow meter and frequency converter of motor of pump, with 30  $\ell/s$  as maximum discharge.

At first, the function and deviation from the desired line was examined against very severe hydraulic conditions as sin curve that had very little mean discharge and relatively large amplitude and very short period.

Then it was very effective to make the deviation little to adjust the valve opening ratio suitably small, and this deviation mostly owed to the time lag from the desired one.

The time lag and amplitude of input curve had to be reformed as multiplied by function  $K(\Delta t, T, \beta)$  to the desired curve, here  $\beta$  as feed back ratio in  $\Delta t$  and  $T$  as period of sin curve.

Secondly the simulation by digital computer of hydraulic experiment to maintain the water height in hydraulic transient condition as linear increase or decrease of discharge as 2  $\ell/s$  from 10  $\ell/s$  in 5 minutes.

At the experiment, the water height control was done by sensor and relay circuit in control box, which had the adjustments of time lags between the touch of sensor (1 meter up stream side from the gate) and starting of action of up and down of the gate which suited at the down points of the channel.

In the experiment, the surface tension caused some lag between the sensor and gate action, especially by the water ripple on the surface wave in the discharge-increase.

Then discrete digital simulation by TSLW scheme with  $\Delta t$  (0.5 sec),  $\Delta x$  (1 meter) showed sufficient approximation of the real action of the automatic gate and water height in the channel.

---

\* 栽培管理制御工学研究室

### I. 緒 言

実験室の可変勾配開水路の上流端よりパソコンを用いて通水量を制御するシステムは、これまで目標とする流量を、越流水深をチェックしながらバルブを調整してきたことに比べれば、格段の進歩を感じさせる。とりわけ流入量ハイドログラフを任意に与えたり、流入量時系列に周期性を持たせるときには、必要不可欠といえる。また現在この水路には、2本の棒状のセンサーによって水位不感帯を設け、制御盤を通して水路末端にあるスルースゲートを動作し、水位を不感帯の中に安定化できるようになっている。また制御盤のなかのリレーの調整によって、ゲートの休止・作動する速度を調整できるようになっている<sup>1)</sup>。

本研究は、パソコンによる流量制御のうち、小流量の正弦波状変動の制御機能について、特に小流量で比較的振幅が大きく、周期が短い変動を発生させ、目標とする正弦波からの偏差とその形状と、バルブの調整の効果と目標とする正弦波からの偏差を調べた。

次に上流端からの流量が、定常状態から線形的な増減の後に定常状態になる過渡流れのもとで、ゲート付近での水位が電極棒センサーで設定されている幅の水位に収束するように、ゲート開度を自動操作する実験を行った。

自動ゲートは制御盤で与える時間制御要素によって動作する。このゲートの開度と、開水路の上流端・下流端での水位は抵抗線式波高計で計測して変動を調べた。ここで、水路全体でプログラム制御を行うための一助を得るため、同様の上流端からの流入量のもとで、制御盤で与える時間制御要素で対応するゲートの開度と、水路内の水位変動を、T. S. L. W. モデルを用いてシミュレーションを行い、実験時のものと比較した。

### II. 小流量制御機能の概要

パソコンによる流量制御システムはポンプを变速用周波数変換装置とつなぎ、流量計から得られた流量を計測・制御するもので、この概要は図1となる。またここでの制御内容は以下の通りである。

- 1) キーボードまたはマウスによる折線グラフ状の任意のハイドログラフの発生
- 2) 正弦波状のハイドログラフの発生
- 3) 一定流量信号の発生
- 4) シーケンス制御としてのモータ回転数任意指令信号の発生

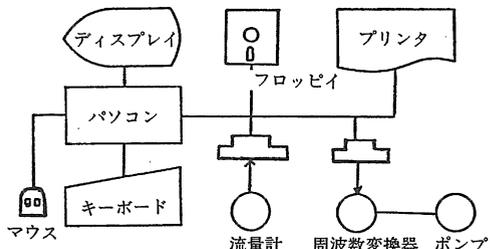


図1 パソコンによる流量制御システムの概要

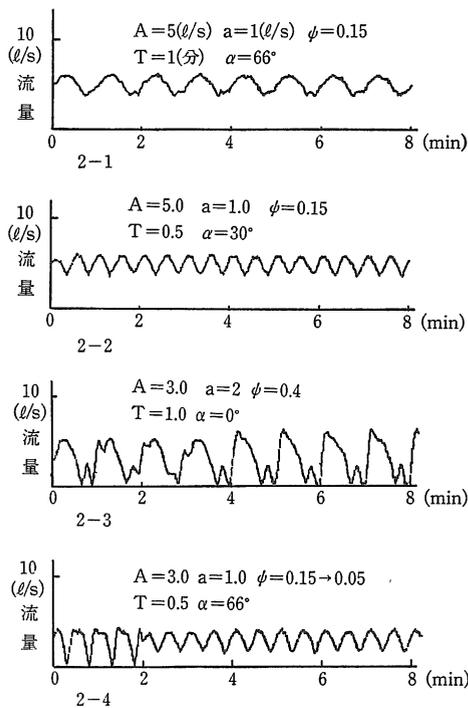


図2 正弦波の形状とバルブ開度の相違による流量変動の比較

表1 周期変動流量との偏差

中心流量	振幅	周期	バルブ開度	偏差
3.0ℓ/s	0.36ℓ/s	0.5(min)	5%	0.30ℓ/s
5.0	0.36	0.5	5	0.14
5.0	0.71	0.5	15	0.22
6.0	0.36	0.5	40	0.15
6.0	1.94	2.0	40	0.14
5.0	1.34	1.0	40	0.26

- 5) フィードバック制御に基づく、一秒毎のモータ回転数指令  
一定流量を流すときは、最上流部の直角三角堰より開

水路に流し込む方法が流量の微細な乱れを消す効果がある。ハイドログラフを任意に与えたり、時系列に周期性を持たせるときには、開水路直上流にパイプで流し込む。

このポンプは、最大 30ℓ/s まで通水できるが、今回は正弦波状の周期変動の流量を対象に、平均流量  $A$  に対して振幅  $a$  が大きいので、かつ周期  $T$  が短いものについて、目標とする正弦波形状からの偏差の検討を行った。 $\alpha$  は目標とする正弦波の位相、 $\psi$  はバルブ（スルース弁）のみかけの開度（全開に対する比）である。

なおフィードバック制御を行うにあたり、 $\Delta t$  (0.5秒) につき目標値と実現値の偏差の  $\beta$  (1/10) を修正するようにした。これまでの研究で、目標とする正弦曲線を  $y(t) = A + a \cdot \sin(2\pi/T)$  とするとき

実際に流れる流量と  $y(t)$  とが交差するところで流量変動の指令が逆転するため、通水量の実際の振幅は  $a$  より小さくなり、右側にずれる形となる。このため、より正確に目標とする正弦曲線を発生させるためには、

$$Y(t) = A + a \cdot K \cdot \sin(2\pi/T + \alpha) \quad (2)$$

としてプログラムすればよい。

ここに、

$$K = \sqrt{\left\{ \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right) + \beta - 1 \right] / \beta \right\}^2 + \left\{ \sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right) / \beta \right\}^2 } \quad (1)$$

ここで

$$\tan \alpha = \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right)}{\cos\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right) + \beta - 1} \quad (2)$$

である。

今回は  $K, \beta$  を用いた補正を行って、バルブの絞り込みの及ぼす効果のみをみた。

平均流量としては 3ℓ/s~6ℓ/s、周期は 2分~0.5分、振幅を 2~0.5ℓ/s の条件での流量変動と、バルブの絞り込みについて検討した。この一例を図 2 に示す。

この図 2-3 ではバルブの絞りを 40% としたこともあり、最小流量が流れたあと、ここから立ち上がりを指示する谷側で、目標とする曲線からのズレが顕著である。また周期が 1 分と短いため、谷部で生じた偏差を急激に回復しようとするため、ピーク流量の出現値が目標値から大きくずれている。

ここで目標とする流量変動を実現するにあたりバルブの見かけの開度比を途中 2 分まで 15% とし、その後 5% に変えてたものが図 2-4 である。これらの目標流量と実際に生じた流量と偏差を、正弦波流れの条件として中

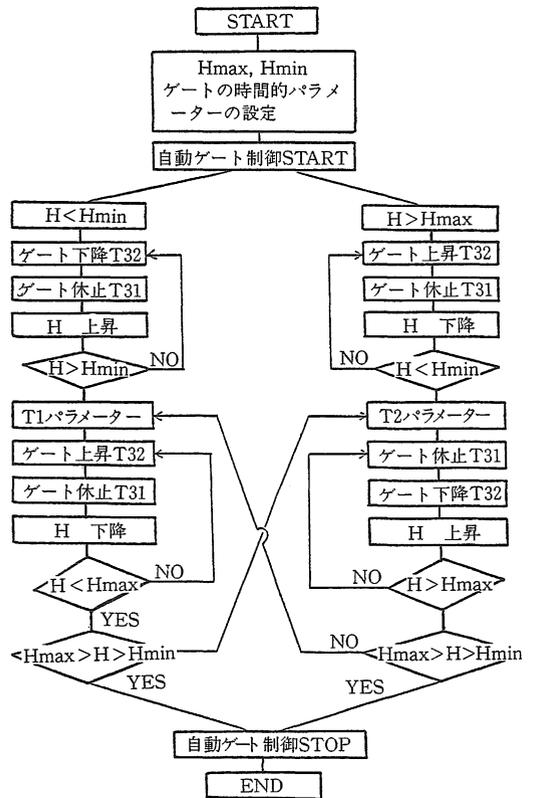


図 3 自動制御ゲートの動作の流れ図

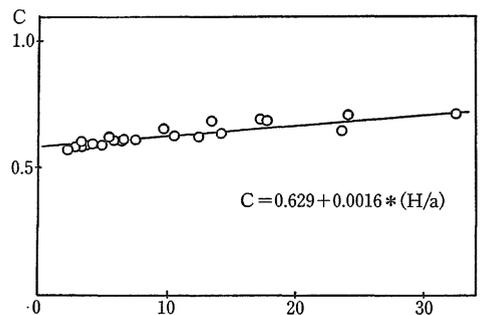


図 4 C~H/a の関係

心流量、振幅流量、周期と共に調べた結果、表 1 を得た。これよりバルブの開度を 0.40 から 0.15、と変えることによる効果が判明できた。

### III. 過渡流れの下での水位安定化の実験の概要

#### 1 水路とゲート動作

水路の諸次元は、上流端から下流端までの全長は20.0 m、幅は 39.0cm、高さは 49.0cm の矩形断面形状で、アクリル樹脂板（厚さ 8mm）製である。

水路底勾配は 0～1/150まで変えることができる。水路内の任意地点に電極棒センサーを置くことができるが、水路最下流部に固定されてあるスルースゲートは、センサー部からの水位情報により制御盤を通して動作する自動的に連動するマイナーループ制御での動作と手動での動作が可能である。このスルースゲートの上昇速度は 0.38cm/s、下降速度は 0.39cm/s である。

マイナーループ制御における時間差の制御概要は、水深の変動が収束するように、設定した不感帯の範囲からはみ出したとき、配電盤のなかで以下の  $T_1, T_2$ …のような時間に関する制御要素が設定できる。また動作の後は強制ブレーキを設けた。

$T_1$ ：水深が不感帯の上限である  $H_{max}$  に達しても、すぐにはゲートが上昇しないで、はみ出しがこの時間を越えたら動作を開始する。

$T_2$ ：水深が不感帯の下限である  $H_{min}$  に達しても、すぐにはゲートが下降しないで、はみ出しがこの時間を越えたら動作を開始する。

$T_{31}$ ：ゲート休止時間。一回の動作の後、休止させる時間。

$T_{32}$ ：ゲート動作時間。一回の動作においてモータを動作させる時間。

従って  $T_{31}$  と  $T_{32}$  を組み合わせて、ゲートの平均昇降速度を与えることができる。

このような挙動を流れ図で示すと図3となる。

## 2 末端ゲートの流量係数

水路末端における水理学的境界条件として、水深  $H$  とそのときの流量  $Q$  が決定されねばならない。このため末端では自由流出の条件のもとで、ゲート開度  $a$  を一定にして、水深が安定したときのデータをもとに図4を得た。ここでの最小自乗法による回帰式を得て、流量係数  $C$  を得て、以下のシミュレーションに用いた。

## IV. T. S. L. W. スキームによる過渡流れのシミュレーション

### 1 TSLW スキームによる非定常流れ

Two-Step Lax Wenderoff scheme は微分方程式を差分方程式に近似するときの精度が良く、安定であること、explicit であるため計算上の便宜が良いこと、さらにこの scheme は、shock wave など保存則を満たしているなどにより、開水路流れのシミュレーションモデルとしての有効性が多く確かめられている。<sup>3), 4)</sup>

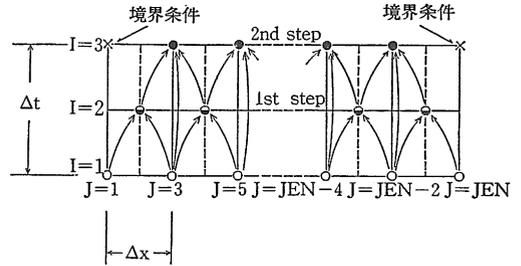
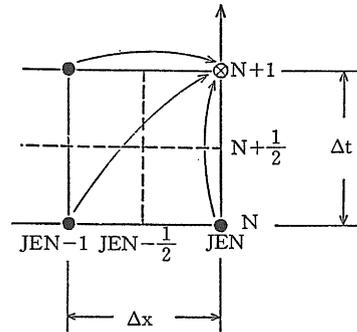


図5 Two-Step Lax Wendroff scheme の演算格子



ただし JENは下流端を示す。

図6 TSLW スキームにおける境界条件の演算格子

一般に河川の不定流の方程式は次の形で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g \left\{ i \frac{n^2 \cdot u \cdot |u|}{R^{3/4}} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot \omega)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

これを  $Q$  と  $\omega$  に関する式にかきかえると次のようになる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{P}{\rho} \right) b + \frac{Q^2}{\omega} \right] = g \cdot \omega \left( i - \frac{n^2 \cdot Q \cdot |Q|}{\omega^2 R^{3/4}} \right) \quad (3)'$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)'$$

ここに、 $u$ ：流速  $\omega$ ：断面積  $Q$ ：流量  $h$ ：水深  $\rho$ ：水の比重  $P$ ：幅  $b$  深さ  $h$  の矩形にはたらく水圧  $t$ ：時間  $x$ ：距離  $g$ ：重力加速度  $i$ ：河床勾配

これを以下のような差分方程式で表す。

第1ステップ

$$n_{+1/2}\omega_{j+1/2} = (n\omega_j + n\omega_{j+1}) / 2 - \frac{1}{2} \cdot$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} (nQ_{j+1} - nQ_j) + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{nQ_s}{2 \cdot \Delta x} \quad (5)$$

$$n_{+1/2}Q_{j+1/2} = - \frac{1}{1 + n^2 \cdot g \cdot \frac{n\omega_{i+1/2}}{(n_{+1/2}R_{j+1/2})^{4/3}} \cdot \frac{\Delta t}{2}}$$

$$\cdot \left\{ \frac{nQ_j + nQ_{j+1}}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ n \left( \frac{P}{\rho} \right)_{j+1/2} - \right.$$

$$n \left( \frac{P}{\rho} \right)_j + n_{+1/2} \left( \frac{Q^2}{\omega} \right)_{j+1} + n \left( \frac{Q^2}{\omega} \right)_{j+1} \right\} +$$

$$g \cdot n_{+1/2}\omega_{j+1/2} \cdot i \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (6)$$

第2ステップ

$$n_{+1}\omega_j = n\omega_j - \frac{\Delta t}{\Delta x} (n_{+1/2}Q_{j+1/2} - n_{+1/2}Q_{j-1/2})$$

$$+ \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot n_{+1/2}Q_s \quad (7)$$

$$n_{+1}Q_j = - \frac{1}{1 + n^2 \cdot g \cdot \frac{n_{+1/2}\omega_j}{(n_{+1/2}R_{j+1/2})^{4/3}} \cdot \Delta t} \cdot \{ nQ_j$$

$$- \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ n_{+1/2} \left( \frac{P}{\rho} \right)_{j+1/2} - n_{+1/2} \left( \frac{P}{\rho} \right)_{j-1/2} \right.$$

$$n_{+1/2} \left( \frac{Q^2}{\omega} \right)_{j+1/2} - n_{+1/2} \left( \frac{Q^2}{\omega} \right)_{j-1/2} + v \}$$

$$g \cdot n_{+1}\omega_j \cdot i \cdot \Delta t \quad (8)$$

ここで  $Q_s$  は支川等流入がある距離ステップのところだけに用いられ、合流量を表し、 $v$  は段波や跳水などの不連続点に備えるために、以下のように定義される人工粘性項である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} < 0 \text{ のとき} \\ v = B - (\Delta x)^2 \cdot \omega \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial u}{\partial x} \geq 0 \text{ のとき} \quad v = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

この scheme の演算格子は図5のようになる。上流端  $j=1$  から下流端  $j=\text{JEN}$  まで、各時間 step 毎に計算することができる。

## 2 TSLW スキームによる境界条件の処理

境界条件として次の4通りが可能である。

- 1) 上流端水深—下流端水深
- 2) 上流端水深—下流端流量
- 3) 上流端流量—下流端水深
- 4) 上流端流量—下流端流量

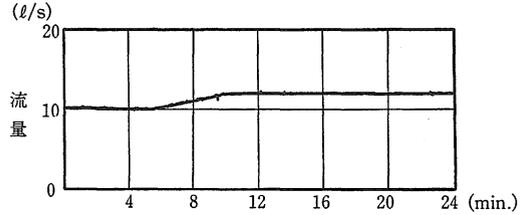


図7 上流端流入量の時間変動 (流量増加時)

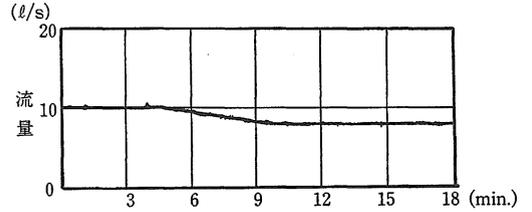


図8 上流端流入量の時間変動 (流量減少)

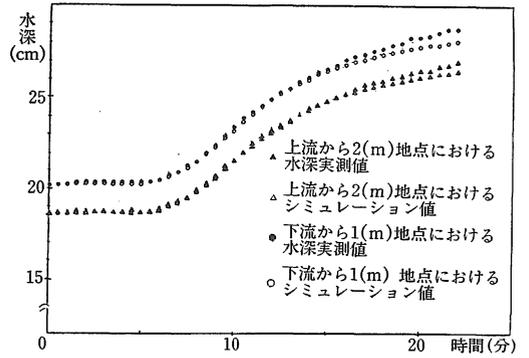


図9 ゲート開度一定 (2.0cm) のもとの実測水深とシミュレーションの比較 (流量増加)

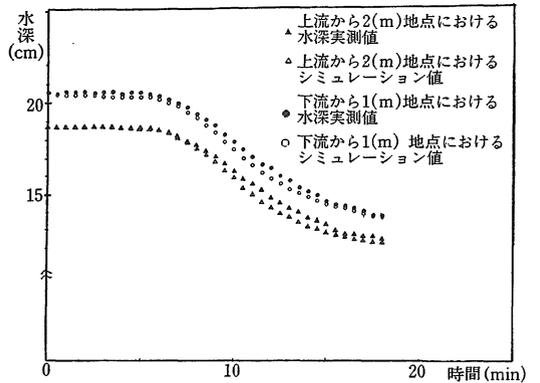


図10 ゲート開度一定 (2.0cm) のもとの実測水深とシミュレーションの比較 (流量減少)

今回の実験では水路上流端における流量はパソコンで制御され、把握されているので、下流端では水深より流量を求めた。これは通水断面積を  $\omega$ 、流量を  $Q$  とし、時刻  $t = n$  で図6の下流端を例にした box-scheme を

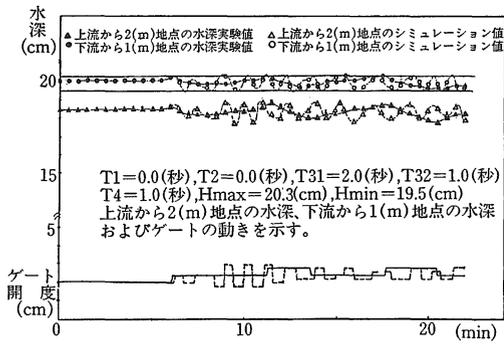


図11 実験時とシミュレーション時のゲート開度と水深の変動 (流量増加1)

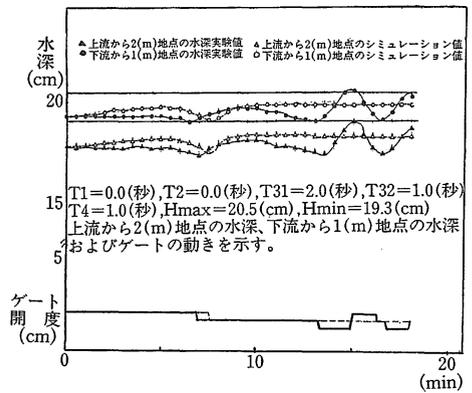


図14 実験時とシミュレーション時のゲート開度と水深の変動 (流量減少1)

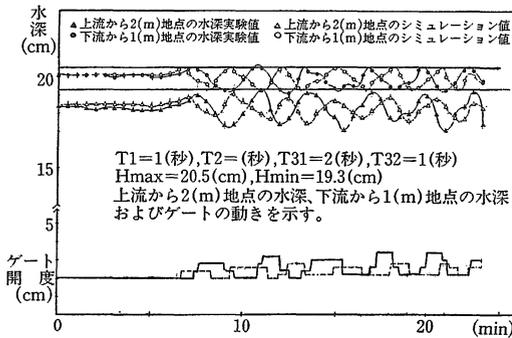


図12 実験時のシミュレーション時のゲート開度と水深の変動 (流量増加2)

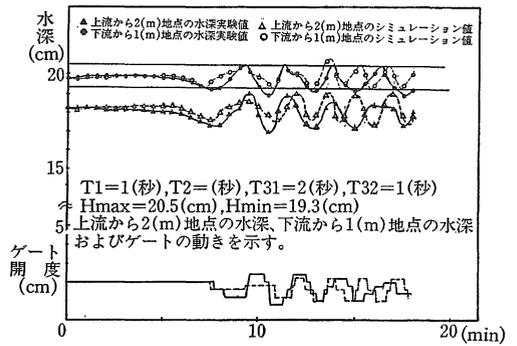


図15 実験時とシミュレーション時のゲート開度と水深変動 (流量減少2)

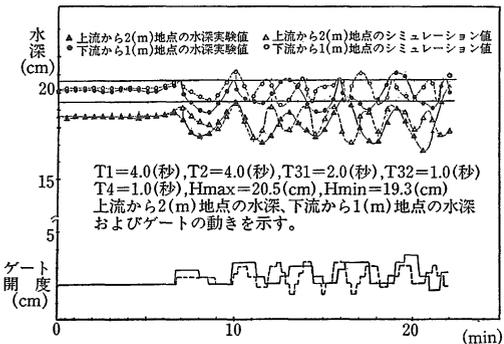


図13 実験時とシミュレーション時のゲート開度と水深の変動 (流量増加3)

$$\frac{n_{+1}\omega - n\omega_{JEN-1}}{\Delta t} + \frac{n_{+1}\omega_{JEN+1} - n\omega_{JEN}}{\Delta t} + \frac{n_{+1}Q_{JEN+1} - nQ_{JEN+1}}{\Delta x} + \frac{nQ_{JEN+1} - nQ_{JEN}}{\Delta x} = 0 \quad (11)$$

$$n_{+1}Q_{JEN} = B \cdot C \cdot a \cdot (2 \cdot g \cdot n_{+1}H_{JEN})^{1/2} \quad (12)$$

ここで  $B$  は矩形水路の幅,  $a$  をゲート開度,  $H$  をゲート直上流側水深である.

### 3 TSLW スキームの安定条件

$\Delta t$  と  $\Delta x$  の間には, 解の安定を得るための(13)式, Von-Neuman 条件を満足しなければならない.

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{u_{max} + \sqrt{g \cdot h_{max}}} \quad (13)$$

この関係は水理現象の伝播と数理モデルとの差を示すもので, この  $\Delta t$  よりも大きな値を時間ステップにとると, 水理現象の伝達速度がモデル上の追跡速度より速くなってしまい, 解の振動がおこる.

用いると, 上流端では(10)式となり, 下流端では(11)式となる. なおこのときゲートでの流量は先の定常状態での実験より得た流量係数  $C$  を用いて(12)式となる.

$$\frac{n_{+1}\omega - n\omega_j}{\Delta t} + \frac{n_{+1}\omega_{j+1} - n\omega_j}{\Delta t} + \frac{n_{+1}Q_{j+1} - nQ_{j+1}}{\Delta x} + \frac{nQ_{j+1} - nQ_j}{\Delta x} = 0 \quad (10)$$

## V. シミュレーションと実験との比較と考察

上流端での流量変動を発生させる前に、まず30分以上の定常状態をつくり、その後図7, 8のように実験開始後5~10分間に10ℓ/sから20ℓ/sの線形な増減の過渡流れを与えた。

ゲート開度を固定したときの水位(水深)変動について、実験時とモデルによるシミュレーション値とを比較し図11, 12を得た。これにより、このシミュレーションのscheme及び計算刻みは良好な再現性を有することがわかる。

つぎに水位がゲートより1m上流側で、不感帯(約1.2cm)に収束させる実験を行った。ここではゲート開度は水位センサーからの情報をもとに、配電盤のリレーを通して、自動動作される。次に同様の定常状態から過渡流れに対し、配電盤のリレーの時間制御要素を取り込んだ、自動ゲートの開度動作と、水位制御のシミュレーションを上記の計算刻みで行い、実験と比較すると図9~10となった。なお実験時のセンサーのゲートからの位置、時間に関する制御要素は図中に示した。

流量増のケースでは、表面波のうえに細かなじょうらんが生じやすい。このとき実験時に $T1 = T2 = 0$ としたときは図11のように、実際にはセンサー水面との間の表面張力により、細かなじょうらんの影響が入る。これをそのまま $T1 = T2 = 0$ として、離散型のシミュレーションを行うと、実験時では見られなかったゲートの昇降が起こり、これに対応して計算では周期の短い水深変動を生じた。

$T1, T2$ を1秒~4秒で与えた実験と、このシミュレーションは、図12, 13のように、実験でのゲートの動作をかなり近似したり、スタートの時間ずれがそのまま変動の位相差の様に現れているが、水位の変動の周期性と形状は、実験時の特性をよく現している。

流量減のケース図14~15ではゲートの挙動が実験時のものをかなり再現していることもあり、水深変動でも同様の周期変動がみられた。またこのときは細かなじょうらんの影響が小さいため、 $T1 = T2 = 0$ としてシミュレーションしたときでも、かなりの再現性が見られた。

水深変動20cmに対して数mmの誤差の内訳を考察すると、実験では連続型で任意の時間においてこの数mmの水位変動を検出し、与えられた制御要素のもとで対応する。一方数値シミュレーションでは、離散型の時間ステップ $\Delta t$ (0.5秒)毎に、計算を行うため、連続型の実験との偏差が生じ、加えてゲートの動作が異なれば水深変動も変わってくる。この偏差は、リレーを用いた制御盤による制御を数値モデルによって再現しようとするときの限界であり、急激な変動ほど $\Delta x$ をより微細にしなければならぬ。一方水路内での各情報を、プログラムに組み込み、走らせた予測を取り込んだ統合制御のためには、演算完了までの時間的制約がある。

また今回は水路内水位の検出には、水中に位置する抵抗線式水位計を用い、不感帯部センサーには電極棒を用いた。流速がより増大するとき、流れの抵抗による波の発生を考えると、表面張力とこの波による水位の計測誤差が生じないように、サーボ式の水位計を用いるなど、水位計測の物理的改良が必要な点も明らかになった。

以上の点を考慮して、今回の水理学的過渡条件での水位一定制御のシミュレーションモデルとして、今回の時間、距離刻みおよびゲートの流量係数の考察を含めたTSLWモデルは、ゲートの自動制御モデルとして有用な再現性を持つと考える。

## VI. 結 言

パソコンによる流量制御のうち小流量の正弦波状変動の制御機能について、目標とする正弦波からの偏差とその形状と、バルブの絞り込みによる開度縮小の効果を調べた。平均流量としては3ℓ/s~6ℓ/s、周期は2分~0.5分、振幅を2~0.5ℓ/sの条件での流量変動と、バルブの開度がやや大きいときは、最小流量が流れたあと、ここから立ち上がり指示する谷側で、目標とする曲線からのズレが顕著である。また周期を短くすると、谷部で生じた偏差を急激に回復しようとするため、ピーク流量の出現値が目標値から大きくずれる。ここでバルブの見かけの開度比を15%、後5%に変えることは、目標の正弦波形状の流量からの、偏差の縮小になり、併せて正弦波形状の維持に効果があるとわかった。

次に水路の上流端からの流量が定常状態から線形的な増減の後に定常状態になる過渡流れに対し、ゲート付近での水位が電極棒センサーで設定されている幅の水位に収束するように配電盤のリレーの時間制御要素を取り込んだ自動ゲートの開度動作と、そのときの水位変動を実験した。この水位制御の水面変動のモデルとしてTSLWスキームを用い、時間刻み $\Delta t$ を0.5秒、距離刻み $\Delta x$ を1.0mとして、ゲートのシミュレーションを行ない、実験と比較した結果、センサー水面との間の表面張力による細かなじょうらんの影響を含めて、この離散型の自動ゲートの水位変動のモデルとして、有用な再現性をもつことが示された。

本研究を進めるにあたり、大谷哲也君(現在島根県赤来町役場勤務)、金楽潤君(現在カナツ技建工業勤務)の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

## 引用文献

1. 竹山光一・福島 晨・田中礼次郎・大谷哲也：島根大農研報 19：105-109, 1985.
2. 竹山光一：島根大農研報 15：75-81, 1981.
3. 伊藤 剛：数値解析の応用と基礎、アテネ出版, 1976.
4. 榎 晃秀：Two-Step Lax-Wenderoffスキームを用いた不定流解析手法について、水と土, 52, 52~61, 1983.