

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 (I)

— 流れの制御機能について —

竹山 光一*・福島 辰*・田中礼次郎*・大谷 哲也*

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

— On the Flow Control Functions —

Kouichi TAKEYAMA Akira FUKUSHIMA

Reijirou TANAKA Tetsuya OTANI

Some functions of water flow through the tilting open channel flume made of acrylates controlled by personal computer, which is connected with electromagnetic flow meter and frequency convertor of motor pump, respectively.

The comparisons of constant-value, follow-up and programmed controls in stability time lag and features showed as follows.

In constant-value control, the commercial electric source showed the best stability. But in the follow-up and programmed control, the faster the change of desired discharge, the bigger the deviation became.

In particular, in a linear hydrograph as the discharge changed 5 to 20 (l/s) in 12 minutes, the average value of control deviation was less than 0.3 (l/s). Nextly, in the sine curved hydrograph with 8 to 15 (l/s) in average, 2 to 5 (l/s) in amplitude and 0.5 to 12.0 minutes in period was examined. And in order to generate the desired sine curved hydrograph, the necessity of the reformation of input sine curve as the functions of the desired one, $K(a, dt/T, \beta)$, and $\alpha(dt/T, \beta)$ were recognized, where a is amplitude, T in period of desired sine curve, and β in the ratio of the manipulated variable to the control deviation in time dt , where K is multiplier to a and α in phase for reformation.

Then, the Manning's coefficient of roughness, wave propagations and its reformation with amplified or damped oscillation in this flume were easily estimated and this system showed much convenience to such experiment of steady or unsteady flow.

I. はじめに

約20年近く使用されてきた、鉄・ガラス製の可変勾配開水路は、ポンプ、高水槽、水路床、下流端に設置したゲート等の腐食が激しくなり、修理することになった。

ここで水路周囲の粗度の均等性と水路の耐久性などを考慮して、素材はアクリルとし、近年著しく能力が向上

し廉価になったパソコンを用いて、水路最上流端で、パイプまたは既成の直角三角堰から流し込む流量を制御できるようにした。ここではこれまでの実験結果をもとに、各種の制御機能を比較検討した。さらにこのシステムを用いて、一定時間一定流量制御のもとでの粗度係数の測定と、正弦波状流量制御のもとでの水面測定により水路内での波高の増幅と減衰などの伝播と振動を調べた。

* 農業水利工学研究室

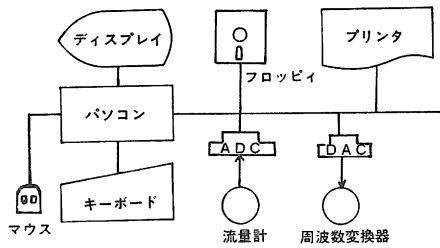


図1 パソコンによる流量制御システムの概要

II. 新水路の流量制御

既設の可変勾配水路の支持台と鉄フレームはそのまま利用し、この内側に透明アクリル樹脂板（厚さ 8mm）による開水路（外断面寸法：W 430～405mm, H 490 mm, L 20,000mm）を設けた。2 mごとのアクリル板の間の接合部では当板として発泡ポリエチレンを用い、水路内側にはシリコンシーラントで滑らかに、かつアクリルの伸縮を吸収するようにし、鉄フレームとは、底部には平鉄棒で、側部にはアクリル薄板を当てた。また水路断面のひずみを防止するために水路天端を補強した。水路下流のスルースゲートは既設の水位自動制御装置と連動させた。

実験室の水路は上述のもの外に底勾配 0 の固定開水路（コンクリート製）があるため、これらにも流量供給を可能とした A, B 2 系統の配管を結びつけている。最大流量は A 系統が 30 l/sec で B 系統が 20 l/sec でこれらのポンプはそれぞれモータ変速用周波数変換装置（通称インバータ）につなぎ、前者は電磁式流量計と、後者は差圧式流量計とつなぎ、それぞれパソコンとつながれている。この概要は図 1 である。

パソコンによる制御内容は以下のとおりである。

- i) キーボードまたはマウスによる折線グラフ状任意ハイドログラフの発生
- ii) 正弦波状ハイドログラフの発生

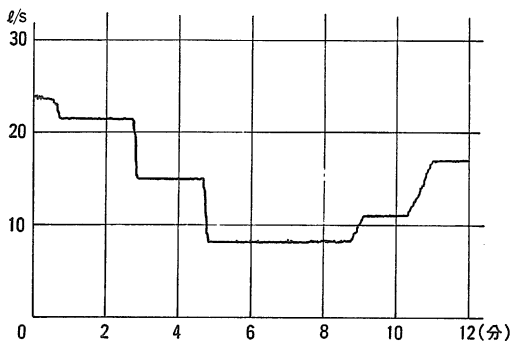


図2 電磁流量計の変動値（商用 60 Hz でインバータを固定したもの）

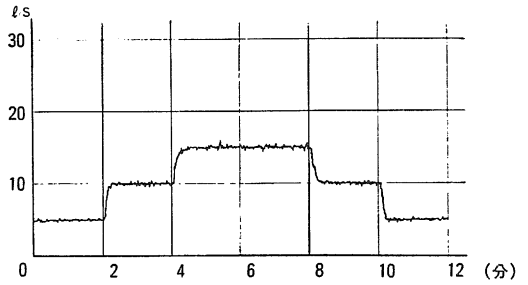


図3 電磁流量計の流量変動（一定流量信号をキーボードより入力）

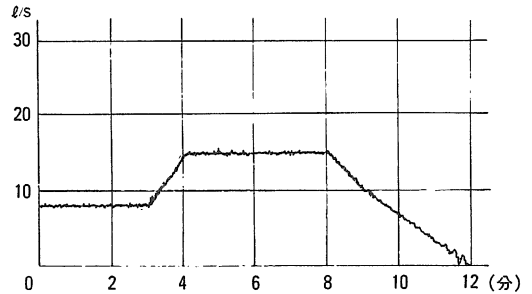


図4 電磁流量計の流量変動（直接の変動をマウスより入力したもの）

表1 直線的制御における偏差の例

制御方式	一定流量（キーボード入力）5分	直線増加（マウス）10分	
平均 l/s	9.0	13.0	9.0
max. l/s	9.1	13.2	10.3
min. l/s	8.8	12.6	7.8
目標からの偏差（標準偏差）	0.01	0.03	0.14

l/s (8 l/s~10 l/sec)

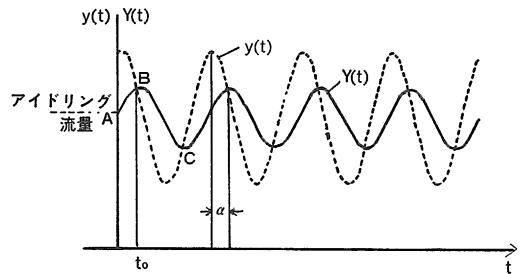


図5 正弦波状ハイドログラフの制御

- iii) 一定流量信号の発生
- iv) 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
- v) フィードバック制御に基づく 1 秒毎のモータ回転

数指令

vi) ディスプレイおよびフロッピィに流量制御データ(実際に流れたデータを含む)を収録し, NEC 9801システムとの相互のデータ転送

このようにパソコンを介してインバータの周波数を変えて流量を変化させる外にパソコンを流量の表示と記録のみに用い, 手でインバータの周波数を調整し流量を変える, 商用 60 Hz でインバータを固定してバルブの開度を調整して流量を変えることもできるようにした。

計測時間は6分単位で12分~360分間であり, この間を480区間で分割した各点での流量を目標として与え, かつ実際に流れた流量を収録することができる。用いたパソコンは8ビットのシャープX1ターボである。

III. 流量制御機能の評価と問題

この8ビットパソコンは流量計からのデータを目撃値と対照し, メモリーに書き込みつつインバータを制御している。当初線形的流量増減についてこの目標値との偏差の1/5を当初1秒で修正させたが逆に偏差が大きくなったので, 1/10を1秒で修正させるようにした。A/Dコンバータの精度より, ここでの流量表示の0.1 l/sec未滿は信頼性が低いとされるが, まず一定流量の持続, 次に流量増減を線形的に行った実験例は図2~4および表1となった。これより安定な一定流量を維持するには, インバータ固定が最も良く, 流量増減の勾配が大きくなるとインバータの追従が遅れることがわかった。

次に正弦波状流量ハイドログラフについてみると, 図5のように, はじめ「アイドリング流量」と称する一定流量を与えておく。実際の目標となる流量をY(t)とし, これよりαだけ位相があるy(t)をパソコンにインプットしたとし, t=t₀のBで両者が交わるとき, パソコンから流量増の指令が停止し, これが最大流量となる。すなわちα≠0とし

$$y(t) = A + a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \alpha\right) \quad \dots\dots(1)$$

$$Y(t) = A + a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad \dots\dots(2)$$

ここで t=t₀ で(1)=(2)より

$$t_0 = \frac{T}{2\pi} \tan^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}\right) \quad \dots\dots(3)$$

$$Y(t_0) = A + a \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}\right)\right) \quad \dots\dots(4)$$

よって max[Y(t)] < A + a

今回の制御のように Δt 秒間に (y(t) - Y(t)) * β の修正が Y(t) にされるとすると次式が成りたつ。

$$Y(t + \Delta t) = \{y(t) - Y(t)\} * \beta + Y(t) \quad \dots\dots(5)$$

(5)に(2)を代入し(6)が得られ, これより(6), (7)のように振幅と位相

$$A + a \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t + \Delta t)\right\} = \beta y(t) + (1 - \beta) *$$

$$\left(A + a \sin\frac{2\pi}{T}t\right) \quad \dots\dots(6)$$

$$\therefore y(t) = A + a * K \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \alpha\right)$$

$$K = \sqrt{\left(\frac{\cos\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right) + \beta - 1}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right)}{\beta}\right)^2}, \quad \left. \begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{\sin \frac{2\pi}{T}\Delta t}{\cos\left(\frac{2\pi}{T}\Delta t\right) + \beta - 1} \end{aligned} \right\} (7)$$

を調整した y(t) を図5のようにパソコンにインプットしなければならない。すなわち図6~8を比較すれば, 周期が短く, 振幅が大きく β が小さいものほど調整の

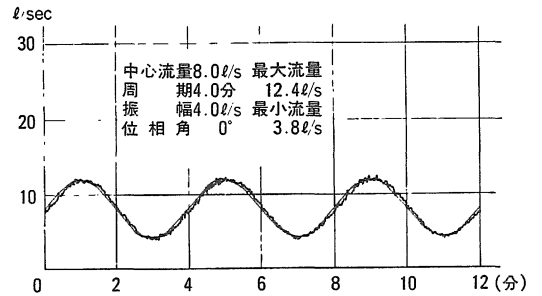


図6 電磁流動計の流量変動(正弦波状ハイドログラフ)における正弦波と制御流量

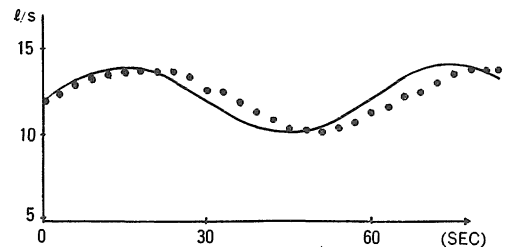


図7 電磁流量計の流動変動(正弦波状ハイドログラフ)における正弦波と制御流量(制御偏差の絶対値の平均 0.31 l/s)

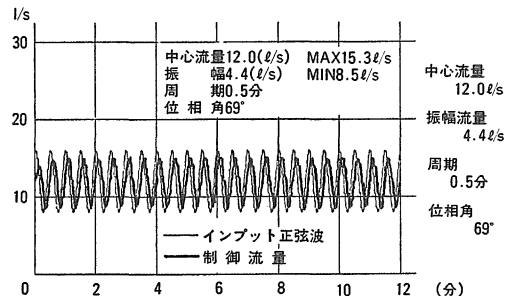


図8 電磁流量計の流動変動(正弦波状ハイドログラフ)における正弦波と制御流量(β=0.1, 制御偏差の絶対値の平均 0.21 l/s)

効果が大きいことがわかる。またこれまでの実験より、(7)の K の値をそのまま用いると、流量の振幅の中心が下にずれるため中心流量を調整し、これと(6)、(7)の $\beta=0.1, 0.2$ を比較した結果、表2のようになり $\beta=0.2, \beta=0.1$ のとき K によって補正したものおよび中心流量と振幅の同時調整の順で制御偏差の絶対値の平均が小さくなった。

IV. 非常流制御下の水位変動

1. 粗度係数の測定

全長 20.0m のアクリル水路、勾配 $1/1000$ の中央部で 10.0m 離れた 2 測定点を定め、ゲート開度を一定にしておき、一定時間に一定流量を流す実験を行

表2 正弦波状流量ハイドログラフのインプット $y(t)$ による実際流量と理論値との差

実験No.	中心流量 (l/s)	振幅 (l/s)	位相角差	平均絶対偏差 (l/s)	β
8302 1	12.0	2.0	36	0.44	0.1
8304 2	12.2	2.3	36	0.37	0.1
8305 3	12.0	2.0	24	0.52	0.1
8306 4	12.2	3.6	24	0.98	0.1
9121 5	12.0	2.0	0	0.93	0.1
9172 6	12.0	4.4	69	0.21	0.1
9174 7	12.0	2.7	49	0.19	0.2

(周期 30秒)

った。流量の微小振動を消去するため、直角三角堰より流入させ、堰の越流水深および各測定点での水位は波高計→アンプ→記録紙→ディジタイザの流れで処理した。結果は図9となる、これよりこの水路の Manning の粗度係数は 0.010~0.011 と推定できた。

2. 正弦波状流量変動による水位の伝播

「正弦波状流量ハイドログラフ」によって流量変動を与えるとき、これによって生じる水位の伝播を考察する。このとき直角三角堰の貯水による入力波の変形を除くため、堰ではなく水路最上流端のパイプから流す。水路勾配 $i=1/1000$ とし、ゲート開度を固定し、はじめのうちは一定流量制御の定常状態で不等流とする。水深の計測点は、ゲートより直上流側 2.5m 点を「下流点」、これより 8.0m 上流側を「中流点」、これより 7.5m 上流側を「上流点」とする。ゲート開度は 2.0cm, 3.0cm, および全開のいずれも自由流出である。流量 12.0 l/sec に対する等流水深は 7.5cm, 限界水深は 4.7c m となり流れは非常時も常流であるが、ゲート全開のときは低下背水曲線、他は堰上げ背水曲線と考えられる。非常時の最低水深と生じた波高のうち第1~3波までを

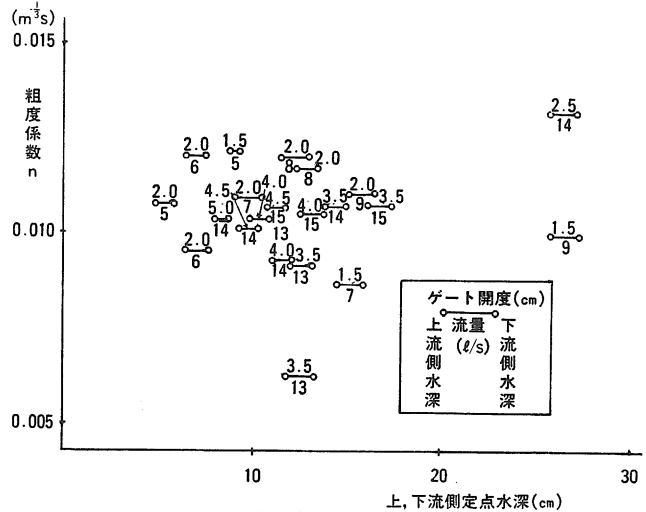


図9 粗度係数の実験結果

表3 上流端より正弦波状流量入力による波高の伝播

ゲート開度		20.0mm	30.0mm	全開
最低水深	上流	255	289	128
	中流	269	297	133
	下流	280	305	139
水面形の分類		M 1	M 1	M 1
第1波高	上流	3.7	3.6	5.3
	中流	8.6	6.0	4.4
	下流	6.0	4.8	11.0
第2波高	上流	3.5	2.4	4.5
	中流	8.6	4.5	4.4
	下流	6.0	4.8	10.0
第3波高	上流	3.0	3.0	3.8
	中流	9.4	5.0	4.4
	下流	6.0	4.8	10.0
流量の振幅		3.0	2.0	2.0

(単位 mm, l/sec)

掲げると表3のとおりである。周期はいずれも60秒、平均流量は 12.0 l/sec, 振幅は 2.0 と 3.0 l/sec としている。ゲート開度が小さくなると、上下流点より中流点での波高が比較的大きくなり、振幅が大きいほどこの傾向が顕著である。ゲート全開時のM2では流下するに従って波高が大きくなる。

ゲート全開と、開度 2.0cm とにおいて各測定点における水深の時系列 ($x_i, i=1 \sim n$) の測定点による周期成分相違を調べるため自己相関係数 $r_k (k=0, \dots, m)$ を求め、これより(8)を用いて各周波数におけるスペクトル G_k を求めた。

$$G_k = \frac{1}{m} \left\{ r_0 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} r_i \cos \left(\frac{\pi i k}{m} \right) + (-1)^k r_m \right\} \quad (8)$$

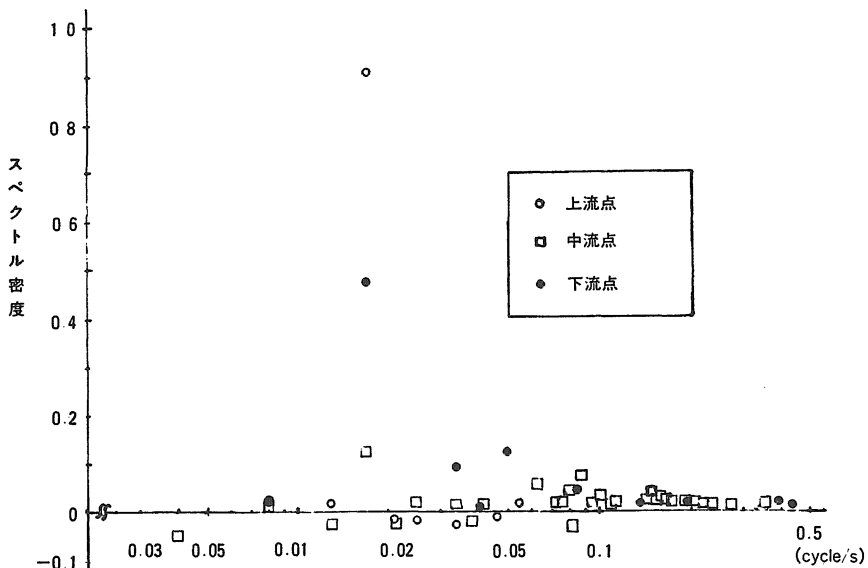


図10 正弦波状ハイドログラフ (平均 12 l/s, 振幅 2 l/s, 周期 1分) による, ゲート全開時の各測定点水深変動のスペクトル

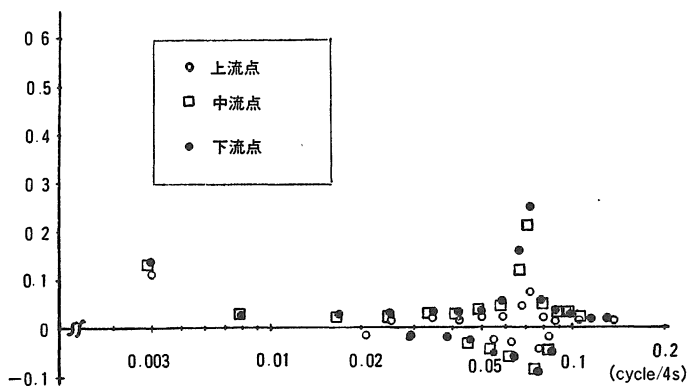


図11 正弦波状ハイドログラフ (平均 12 l/s, 振幅 2 l/s, 周期 1分) によるゲート開度 2cm での, 各測定点水深変動のスペクトル

ゲート全開時は3点とも水深が浅く, 短い周期の乱れが存在するため, 1秒間隔でディジタイザ上の水位変動を読み, 図10を得た。入力流量の周期60秒に相当するのは 0.017(cycle/s)である。上流点, 下流点ではこの周期が卓越し, 中流点ではこの周期成分は他のものより大きい, 10~20秒の周期成分の影響もかなり大きい。

ゲート開度を 2cm とし, 4秒間隔でデータを読んでスペクトルを求めると図11となり, 周期60秒はここでは 0.067/(cycle/4s)となる。下流, 中流点ではこの成分がかなり大きい, 上流点では他の周期成分よりやや大きい程度である。

V. あとがき

アクリル製可変勾配開水路の流量をパソコン, 流量計,

インバータとモータ, ポンプをつないで, 一定流量制御, 目標流量の追従制御, 目標流量のプログラム制御を安定性と時間おくれなどについて調べ特徴を比較した。特に正弦波状の目標流量を制御する際は, インプットする正弦波の振幅と位相を, 目標流量の正弦波形と, パソコンシステムの中での偏差の単位時間における修正率との関数であることを示した。今後はより改良されたセンサーの導入や, 水路の水深を一定するように自動制御される水門と本システムを結びつけることを課題としたい。

参考文献

1. 三觜武: 続・統計プログラム入門, 日科技連, 1971.
2. シャープX1 ターボ user's manual
3. シャープX1 ターボ reference manual.