

PDF issue: 2025-06-26

# 開水路の流速分布からみた流出低減曲線について

畑,武志 山崎,善弘

(Citation) 神戸大学農学部研究報告,17(2):191-196

(Issue Date) 1987

(Resource Type) departmental bulletin paper

(Version) Version of Record

(JaLCDOI) https://doi.org/10.24546/00225604

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/00225604



# 開水路の流速分布からみた流出低減曲線について

畑 武 志\*・山 崎 善 弘\*\* (昭和61年8月11日受理)

# RUNOFF RECESSION CURVES COMPUTED FROM VELOCITY DISTRIBUTION IN AN OPEN CHANNEL

Takeshi HATA and Yoshihiro YAMASAKI

#### Abstract

The flow processes after the sudden stop of the inflow at the upper end of an open channel with uniform flow are discussed based on the experimental data. The method of computing the recession hydrographs from the channel reach by using the equation of measured or estimated distribution of flow velocity is proposed. The data measured at the two laboratory channels are used for the verification of the method. The computed recession curves from the channel reaches explain well the observed data in both cases of laminar and turbulent flows.

#### I. はしがき

流出量の逓減曲線は流域の物理的特性を反映するもの として、種々検討が加えられ、また、流出解析にも用い られてきた。これらは主として地下水流出についての検 討であったが、表面流出についても水系網等の物理特性 れ反映するものとして重要な意味をもっている。kinematic wave modelによって表面流出の逓減状況はある程度 再現可能であるが、流域における実際の流れが水みち状 の複雑な流況を呈していることが明らかになってきてお り、必ずしもこのモデルで問題が解決されている訳では ない。

筆者らも以上の諸点を明らかにする目的で幾つかの実 験を行なってきたが<sup>1,21</sup>,表面流出については。単に平 均流速では片付けられない側面があり、この報告では流 量の逓減がどのようにして起こるかを従来とは異なる視 点から考察した。即ち,流速分布を基にして各流体要素 の流出口への流達時間差から流出量の逓減を表現できな いか検討を行ない、その方法を明らかにするとともに、 実験的な検証を行なった。流れの流速分布に注目するこ とによって、表面流出の低減問題について一つの接近法 を開発したものであるが、従来必ずしも明確でなかった

\*\*川崎重工業株式会社

表面流出成分の分離,到達時間等基礎的問題についても 検討する一つの足掛かりとして実験的な研究を行なった ものである。

# Ⅱ. 流速分布から低減曲線を推定する方法

横からの一様な流入のある水路の浅れにおいて、その 流入が停止した場合の流路末端部における流量の逓減に ついては、kinematic wave modelによって容易に計算で きる。しかし、上流からの一定量の流入だけがある水路 において、急に流入が停止した場合の水路末端部の流量 を計算すれば、一定流量が継続した後、突然流量が零に なる。平均流速で考える限りこのようになるが、実際に は後で実験例を図-4及び7にあげるように、滑らかな 実験水路においても水路末端部の流量は長く尾を引く逓 減形状をとることが示される。

後者における実測と計算の違いは、流れの流速分布に 起因するものであると推測されるが、流出現象にかかわ る粗度の大きい自然流路での流れを考えた場合、この影響は相当大きくなることが予想される。また、前者の場 合においては、横からの一様な流入によって、水路縦断 方向に水面変化が現われ、その結果として流入停止後の 流量逓減曲線が計算されるが、流速分布を考慮すれば必 ずしも横流入を考えなくとも、同様な逓減曲線が得られ る可能性がある。逆に言えば、流速分布を考慮しない場 合 横流入の影響を過大に考える危険性もでてくること

<sup>\*</sup>水利用工学研究室

になる。

このため,先ず室内水路実験による等流状態から流入 が停止した場合の流量逓減曲線を,流速分布式を使って 再現することを考える。

一様勾配の矩形水路に一定流量の水を流した場合,水 深及び水路横断方向に流速分布が生じる。この時,上流 からの給水を遮断すると,流路内の水は下流へ流れ去ろ うとし,流量の逓減が起こる。水路地点Lにおける流量 Qは,その地点 t時における流水断面積をAt,横断方 向の流速分布をu(y,z) で表わすと

 $q(t) = \int \int_{At} u(y, z) dy dz$ 

となる。流速分布の最大値を $u_{max}$ とすると、下流Lの地 点では、遮断後  $t=L/u_{max}$ 時までは流量は定常時の値  $q_o$ に等しく、以後低減する。従来の平均流速による考え 方でいけば、遮断後 t=L/u (uは平均流速)まで $q_o$ で その後急に0となる。

#### 1. 流れが層流の場合

(1) 水深方向の流速分布式による方法

水深に比べて流路幅が広い場合,側壁での摩擦抵抗の 影響を無視して深さ方向の流速分布だけを考えればよい。 層流についていえば,水の粘性係数をμ,単位重量をw, 水深をH,流路勾配をθと置くと,水深 z の方向の流速 分布は次式で表わすことができる。

それ以後 (t>L/u(H)) の流量の逓減については,  $t-\Delta t/2$ 時,  $t+\Delta t/2$ 時の下流端水深をそれぞ れ $z_{j, 2j+1}$ とおくと,次式で表わすことができる。



図-1 流量低減時水面形の時間的変化

 $q(t) = [B(t+\Delta t/2)f_o^{2j+1}u(z) dz]$ 

 $-B(t-\Delta t/2)\int_{o}^{z_{j}} u(z) dz ]/\Delta t$ 

 $+(BL/\Delta t)(z_{j}-z_{j+1})$  ..... (3)

図-1のように流量低減時の水面変化が起こり,水面 低下分だけ下流端Lから流出していくと考えることがで きる。

(2) 水深及び横断方向の流速分布を考えた場合

流速が水深方向のみでなく,横断方向にも変化する一 般の場合について考える。側壁での摩擦抵抗の影響を考 慮して,円管における流速分布式を用いると,水深zj における横断方向の流速u<sub>1,1</sub>は次式で示される。

 $(2/b) \int_{0}^{b} u_{y_{i}j} dy = u_{j}$ 

#### であるから,

 $u_{y_{a}z} = (3/2b^2)(b^2-y^2)(hz-z^2/2) w \sin \theta / \mu$ 

断面内の流速分布が上のように決った層流の流れにおいて,水路下流端での流出量の低減は以下のように算定できるだろう。流れの横断面内流分布を図-2のように y, z方向に△y, △zの微小な長さをもつ m×n 個のメッシュに分割して取り扱う。流心線を中心に流速分布が左 右対象である場合は y方向にはB/2の範囲を考え,算 定結果を2倍にして水路流出量とすればよい。

図に従って上流端流入遮断後の流路下流端からの流出 量の変化は,各メッシュの四隅の流速を u<sub>1-1,j-1</sub>, u<sub>i-1,j</sub>, u<sub>i,j-1</sub>, u<sub>i,j</sub> (i = 1 ~ m, j = 1 ~ n)として



次のように計算できる。関係時間をtで表わせば,各格 子点位置にある流体要素のt時間の進行距離は $x_{i,j} = u_{i,j}$  $j^t, x_{i,j-1} = u_{i,j-1}t, x_{i-1,j} = u_{i-1,j}t, 及びx_{i-1,j-1} = u_{i-1,j-1}t と表わせるから,流れの一様な層流の場合,$ t = 0 からtまでの水路末端からの流出量は,一つのメッシュ当り近似的に次のように計算できる。

 $\Delta v_{1, j, t} = (2x_{1-1, j-1} + x_{i+1, j} + x_{i, j-1})$ 

 $q(t) = [v(t+\Delta t/2)$ 

## 2. 流れが乱流の場合

流体粒子が不規則な運動をする乱流の場合,流速分布 も一定したものではないが,先ず水深方向について次の 放物線式を考える。

u<sub>i,z</sub>=K<sub>y</sub>(Hz-z<sup>2</sup>/2) ……(9) 水路側壁からの距離y<sub>i</sub>における水深方向の平均流速は次 のように求められる。

 $u_{i_z} = (\int_0^H u_{y_z} dz)/H$ 

 $=K_{v}H^{2}/3$ .....(10)

ここに、Kyはy地点の係数である。水路底を基準にした水位ziにおける水路横断方向の流速分布を次式で表わすと、

(10)及び(11)式から Ky=3(ay<sup>2</sup>+by+c)/H<sup>2</sup>
 となる。ここで、a, b, cは定数である。従って、断面
 内任意点(y, z)における流速は次式で表わせる。

u<sub>y,z</sub>=3(ay<sup>2</sup>+by+c)(Hz-z<sup>2</sup>/2)/H<sup>2</sup>.....(12) ここに, y, zはそれぞれ水路側壁,及び水路床から測っ た距離である。

次に、水深方向の流速分布に Nikuradse の滑面の 場合の流速分布式を適用すると

u<sub>y</sub>/u<sup>\*</sup> = A + 5.75 log<sub>10</sub> (u<sup>\*</sup> z/ν) ……… (13) となる。ここに、u<sup>\*</sup> は摩擦速度、ν は動粘性係数、A は定数である。(13) 式から、水路側壁からの距離y<sub>i</sub>の 鉛直断面の平均流速は次式で表わされる。

 $\overline{u}_{i_{a}z} = (\int_{0}^{H} u_{i_{a}z} dz) / H = u^{*} \{ (A - 5.75 / \log_{e} 10) \}$ 

+ 5.75 log<sub>10</sub>(u\* h/ $\nu$ )}/H ……… (14) 上式で、平均流速 $\overline{u}_{i_x} = \overline{u}_y$ は測定できるから、A =  $\overline{u}_y$ /u\* + 5.75/(loge10)-5.75 log<sub>10</sub> (u\* H/ $\nu$ )となり、 水路側壁から横断方向にy,水路床からzの点における 流速 uy,zは(11)式を用いて次のように表わすことが できる。

$$u_{y_s z} = (ay^2 + by + c)/u^* + 5.75 \log_e 10$$

$$-5.75 \log_{10}(u^* H/\nu)$$

5. 
$$75 \log_{e}(u^{*}z/\nu)$$
 (15)

乱流の流れでは流線が交わり,層流のような考え方は本 来できない。しかし、(9)、(13)式で示される平均 流速の分布式が存在するように,統計的にみれば,各流 速成分をもつ流体要素がこれらの式で示される割合で存 在するとみることができ,層流の場合と同様に、(7), 及び(8)式の関係を用いて水路の流出量を計算するこ とが可能である。

## Ⅲ.実験及び解析結果

#### 1 屋内小水路による実験

上の考え方と解析方法を検証する目的で屋内と屋外の 二つの水路で実験を行なった。先ず屋内実験のために, 0.25~0.85mmのふるいを通過した微細粒子を貼りつけた アクリル板で幅2cm,長さ150cmの図-3のような粗面 水路を製作した。上流端から一定量を給水し、下流端か

france					
実験	流量	水深	平均流速	フルー	レイノ
番号	cc∕s	сm	cm∕s	ド数	ルズ数
1	6.8	0.21	16.9	1.3	217
2	9.5	0.25	19.0	1.4	289
3	9.4	0.22	21.5	1.6	294
4	8.7	0.22	19.7	1.5	273
5	9.9	0.25	20.2	1.5	303
6	6.4	0.20	16.0	1.2	204
7	9.7	0.21	23.1	1.8	306
1					

表-1 屋内小水路実験条件



### 図-3 屋内小水路実験装置

らの流出量を水槽に導き,定常時の流量を測定した。

給水停止後は短時間,定常時の流量が維持された後, 低減を始めるが,その微妙な変化過程を捉えるために, 上流端水槽の給水口を閉鎖して給水停止すると同時に下 流端に取り付けた長さ15cmの補助水路の切り離しによっ て流出水を図の位置にあるメスシリンダに導き,その水 位変化を高精度のサーボ式水位計で測り,自記記録させ た。このように1000ccのメスシリンダを用いることによっ て,小流量の変化を遅れ時間なしに測定できる。

表-1に定常状態,即ち,低減開始前における実験条件を示したが,流量は6~10cc/s,平均水深が0.2cm 程度,平均流速が16~23cm/sの範囲で7回の実験を行 なった。水路勾配は35/1000である。流れのレイノルズ 数は200~300であり,層流である。また,フルード数 は1.2~1.8であり,射流の流れである。

図-4に実線で実験結果を示し、定常状態の流れから 始って、流出量が低下していく過程をハイドログラフに 描いた。このように平均流速だけでは説明できない現象 として、給水停止後2~4秒程度定常時の流量が続いた あと、15~20秒で大きな流出量の低減が起こり、その後、 残りの雫が落ちる程度の流出が続く。 同じ図に,流速分布式を基にして上述した方法で計算 した流出量を示している。即ち,(1)式による水深方 向の流出分布を基にした算定結果を点線で,また,(4) 式も考慮して横断方向の流速分布も計算した結果を1点 鎖線でそれぞれ描いている。これらの結果から,流速分 布式によって層流の流量低減を表現できることがわかる。 水深方向の分布だけを考えた場合,定常時の流量が実際 よりも長く続く。横断方向の流速の変化をも考慮するこ とによって,その点が改善されて実測値に近づくことが わかる。

#### 2. 屋外水路による実験

水路長18.5m,幅0.5m,勾配1/50,水路床が塗装板, 側面鋼板の開水路に図-5に描いた装置で一定流量の水 を流し,等流状態に達した後,上流端への流入を遮断し, 下流端からの流出量の変化を測定した。流出量の測定は 図に示すように下流端に設けた矩形水槽(水面積3.69㎡) の水位変化をサーボ式水位計で測って流量に変換した。 2~4 l/sの流量範囲(水深0.7~1.2cm)で7回の 実験を行なった。

定常状態における実験の諸元を表-2にまとめている。 レイノルズ数は3500~7500と乱流域にあり、フルード数



表-2 屋外水路の実験条件

実験	流量	水深	平均流速	フルー	レイノ
番号	l∕s	cm	cm⁄s	ド数	ルズ数
1	3.9	1.18	66.2	2.0	7350
2	3.8	1.15	65.8	2.0	7120
3	2.3	0.81	56.5	2.0	4340
4	1.8	0.71	51.7	2.0	3480
5	1.9	0.71	52.1	2.0	3510
6	2.7	0.89	60.5	2.1	5090
7	3.9	1.12	70.0	2.2	7380



図-4 屋内小水路による実験値及び計算値



は約2.0で射流であることがわかる。図示した位置での 超小型プロペラ流速計(プロペラ部直径5mm)による横 断方向5cm毎に測った流速分布測定結果を示すと,図-6のようである。水深が浅いので1点法で求めた流速で あるが,これらの測定値から最小二乗法で図中実線で示 したように(11)式の係数を決めると,(12)または, (15)式によって断面流速分布が定まる。

図-7には実験結果を実線で示した。この場合上流か





図-7 屋外水路による実験値及び計算値

らの流入を遮断した時刻を0として時間軸をとっている が,遮断後も15~20秒間は定常時の流出量が継続した後 約60秒間の流量低減期が認められた。定常時流量が小さ いほど一定流量の継続時間が長くなっているが,最大流 速が小さい場合,下流端への到達時間 t=L/u(H) が 長くなるためと考えられ,流速分布との関係から説明で きる現象である。

同図には、流速分布式から(7),(8)式によって 算定した逓減曲線も描いた。この場合、水路横断方向及 び水深方向の分割数は m=10, n=28 である。水深方 向の浅速分布に(9)式の放物線式を適用して算定した 結果を1点鎖線で、また、NIKURADSE の(13)式を適用 した計算結果を点線で示した。(9)式によれば流入遮 断後の一定流量継続時間がほぼ一致するが、(13)式で は6秒程度長く算定され、最大流速値が(13)式で小さ くなった結果である。いずれも計算による低減曲線の勾 配がきつくなっており、水深方向の流速分布式の妥当性 について問題はあるが、全体の傾向はよく捉えており、 上述のモデルで乱流の場合にも現象が説明できることが 分かる。

#### Ⅳ. むすび

表面流の流量低減過程について,従来平均流速を用い て片付けられていた問題に関して,流速分布を考慮して モデル化し,現象を明らかにしようとしたものである。 ここでは基礎的検討として,開水路の流れにおいて流量 の低減が流速分布に支配されることを示した。定常状態 の流れから急に流入を遮断した場合の流量低減過程につ いて,各種流速成分をもった流体要素の存在割合から下 流端へ到達する流体量を求めるモデル化を図り,層流の 場合と乱流の場合について実験的に確かめた。

スケールを異にする二つの開水路を用いて流量低減過 程について実験を行なった結果,平均流では説明できな い低減時の流れが観察された。このように流量の漸減現 象について,層流及び乱流の場合いずれも上のモデルで 説明できた。

従来,平均流速で包括されてきた流水の中身を調べる と,速度の速い流体要素から非常に遅い速度のものまで さまざまであり,遅い成分は短距離の実験水路において も量的にかなりの割合となることから,実際の河川流域 の表流水においては無視できない意味をもってくると考 えることができる。このため、ここで行なったような考 え方を基礎にして,実験流域における表面流出の問題に ついても,今後新たな視点で考察することができるであ ろう。

- 引用文献
- 1)畑 武志・吉良八郎・奥谷順彦:神戸大農研報, 16
  (1), 227-235, 1984.
- 2)畑 武志・奥谷順彦:神戸大農研報,16(2),419 -425,1985.
- 3)松梨順三郎:水理学,pp.143-157,朝倉書店,1975.