

II-36

汚染物質の流下に与える堰の影響に関する研究

株式会社 福田水文センター ○正会員 神尾謙太郎  
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 玉川 尊  
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 渡邊 康玄

1. はじめに

水質事故対策における汚染物質の流下予測手法は、実河川において不等流計算や移流拡散方程式である程度予測可能である<sup>1)2)</sup>が、堰による流れが変化する場合の予測手法はまだ確立されていない。そのため、水質事故における汚染物質の流下予測手法についてその精度向上を図るためには、堰がある河川での流入物質の流下時間と濃度がどのように変化するのかを把握することが重要となってくる。

本研究は、精進川を実河川モデルとして選定し、精進川及び実験室内の水路において食塩水をトレーサーに用いて、堰がある場合と無い場合における実測濃度変化を、不等流計算、移流拡散方程式を用いた予測手法による再現性を検討した。この際、河川において一次元拡散方程式が適用できる範囲について、Fischerの理論式<sup>2)</sup>についても検証した。その成果について報告する。

2. 実験概要

実験は矩形の模型水路による予備実験と、実河川を対象として精進川により行った。各実験においてはそれぞれ堰がある場合と無い場合について行っている。

2.1 模型水路における実験の概要

予備実験には、図-1に示される幅30cm、長さ50m、深さ45cmの実験用水路を用いることとした。実験条件として流量(Q)は430cm<sup>3</sup>/s、水路勾配は1/500で、河床には粒径約0.9mmの三号珪砂を敷き粗度を持たせた。トレーサーとして使用した食塩水は250g/Lの濃度で1回につき10mL投入した。測定には電導度計を使用した。測られた値は、あらかじめ食塩濃度と電導度との相関を実験結果より求めそれを検量線として用いて、塩分濃度に換算した。測定位置は堰の影響を考慮して決定しなければならない。すなわち、堰のある実験においては、堰上げ背水が起きるため、その影響が無くなる上流の地点を投入点として定め、堰の位置は投入点より下流12.0mとした。また、堰の位置を中心として上下流に3測点、合計6測点(投入点より下流 $x=1.5m, 6.5m, 11.5m, 12.5m, 17.5m, 22.5m$ )を測定点とした。さらに堰がない場合も比較できるように同じ測点とした。流速は測点1から4までは電導度と同じ位置で測定し、投入点から下流16.5m、19.5mの位置も加え合計6測点とした。また、水深が浅いため1次元電磁流速計により1点法で測定した。

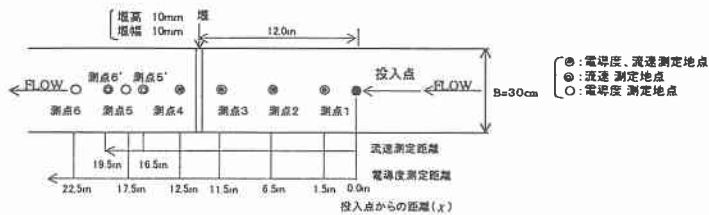


図-1 実験水路および測定地点概要

2.2 精進川における実験の概要

精進川の調査位置図を図-2に示す。図中の数値は、投入点からの距離(m)である。

堰が無い状態の場合の実験日と、堰のある実験日は異なる。このため、後述するが、各実験で若干流量が

Study on Influence of Weir on Transference of Pollutant in Flow  
 By Kentaro KAMIO, Takashi TAMAGAWA, Yasuharu WATANABE

異なっている。堰は(投入点より 30.5m 下流に設置)し、実験を行った。トレーサーとして使用した食塩水は 324 g/L の濃度で、流心と左岸側で投入した。また、濃度が希釈により測定不能とならないようにするため、測定地点までの距離に応じて投入量を調節した。測定位置には模型水路と同様に電導度計を使用した(流速分布を考慮し、測線の横断方向に 5 箇所(水面を 6 等分し、左右岸を除く点について左岸側から 2L, L, C, R, 2R とした。)の測定地点を設けた。さらに予備として、左岸と 2L の中間に測点 3L を設けた。測線の位置は、図-2 に示すように合計 5 測線である。また、両日ともに各代表地点の流量観測を行うとともに、同時水位観測を横断測量の実施した全地点で行い、そのデータは不等流計算を行うための検証データとした。

投入量が調査日、及び調査測線で一定でないため、両日の時系列濃度分布は比較できないが、実測値の流下時間、濃度を参考に不等流計算と移流拡散方程式を用いて流下特性を比較した。

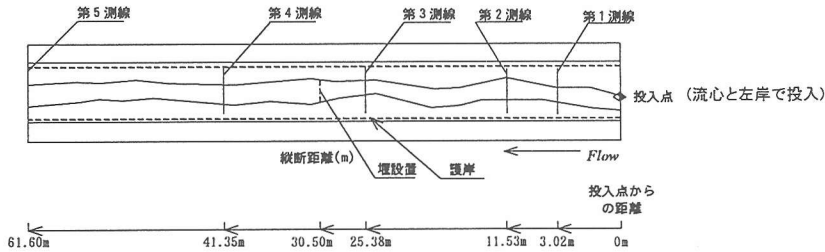


図-2 精進川実験水路図

### 2.3 移流拡散方程式

Fick 拡散方程式<sup>2)</sup>を基にした、投入点より下流の  $x$  地点でのピーク濃度  $C_p$  の移流拡散係数を表す式は、式 (1) で表される。

$$D = 1/\pi(M/2AC_p)^2 = u/\pi x(M/2AC_p)^2 \quad (1)$$

ここで、 $D$  は拡散係数、 $M$  は投入量、 $A$  は断面積、 $u$  は断面平均流速、 $t$  は時間、 $x$  は距離をあらわす。Yotsukura ら<sup>3)</sup>が米国の河川で調査したものと、玉川ら<sup>4)</sup>が北海道内で調査を実施した結果を用い、各河川の川幅水深比と移流拡散係数を断面平均流速と水深で無次元化したものとの関係を回帰式により求めたものが式(2)である。

$$D/uh = 5.42 \times 10^{-3} (B/h)^{2.48} \quad (2)$$

ここで、 $h$  は平均水深、 $B$  は川幅をあらわす。

一方、その他の移流拡散係数と水理諸元との関係には、(3)で表される Elder<sup>2)</sup>の式、(4)で表される Harleman の式<sup>4)</sup>などがある。

$$D = 5.93u_*h \quad (3) \quad D = 224R(gRi_e)^{1/2} \approx 224u_*h \quad (4)$$

ここで、 $u_*$  は摩擦速度、 $R$  は径深、 $i_e$  はエネルギー勾配をあらわす。

不等流計算により各断面の水理諸元を求め、(2)式あるいは(3)、(4)式から求められる移流拡散係数を用いて(1)式により各地点のピーク濃度が求められる。

## 3. 模型水路実験結果

### 3.1 流速分布の比較

流下方向流速を  $U$ (cm)、水路幅の距離を左岸から  $y$ (cm)とし、投入点より下流 1.5m から 19.5m の計 6 断面で測定された流速をそれぞれのケースについて図-3 に示し、測定され

表-1 平均流速

測点	測定位置	堰無し平均流速	堰有り平均流速
	(m)	(cm/s)	(cm/s)
1	1.5	12.87	13.41
2	6.5	12.15	11.39
3	11.5	12.44	8.02
4	12.5	12.48	13.28
5'	16.5	12.70	12.00
6'	19.5	13.13	12.96

それぞれの断面平均流速の結果を表-1に示す。

この結果から、投入点より6.5m 下流の地点までは流速に大きな差は認められなかった。堰がある場合の測点3の位置で堰上げ背水の影響を受けて、流速は堰が無い場合に比べ2/3程度と遅くなっている。堰の下流では測点3の位置で0.8cm/s 速くなっている。

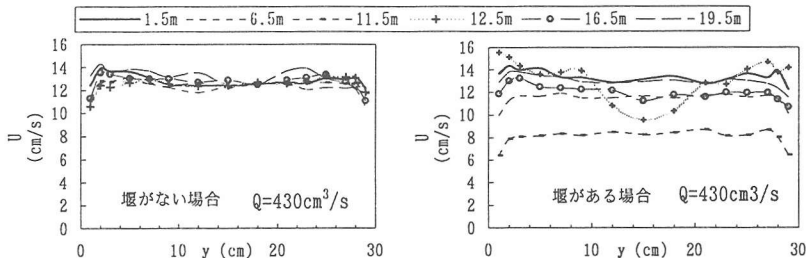


図-3 流速分布図

### 3.2 流下時間の比較

#### 3.2.1 実測値による堰の有無による比較

流下時間の実験結果を表-2に示す。また、流下距離に対する実測値のピーク濃度の変化を図-4に示す。図において投入点より6.5mの地点までは、濃度の差は認められるが、堰を境にほぼ等しい濃度分布になっている。

表-2 流下時間結果

測点	地点 (m)	堰がない場合				堰がある場合			
		流下時間 (sec)	不等流計算 (sec)	差 (秒)	ピーク濃度 (mg/L)	流下時間 (sec)	不等流計算 (sec)	差 (秒)	ピーク濃度 (mg/L)
1	1.5	15.8	12.1	3.6	1411.8	15.7	12.1	3.5	1485.4
2	6.5	53.6	52.6	1.0	511.2	53.4	54.1	-0.6	560.6
3	11.5	93.3	93.1	0.2	223.6	108.6	108.5	0.1	244.0
4	12.5	101.5	101.2	0.4	195.9	118.1	117.9	0.2	203.8
5	17.5	140.9	141.6	-0.7	120.7	158.8	158.4	0.4	134.6
6	22.5	183.3	182.1	1.2	77.2	198.1	198.9	-0.8	100.4

#### 3.2.2 不等流計算による比較

不等流計算においてピーク濃度による流下時間の予測計算結果を図-5に示す。

不等流計算では下流端の水位を0.011mとして計算した。また、流速の測定値の平均を参考に粗度係数を0.0185とした。表-2から、塩水(ピーク)の流下時間は堰が無い場合で、実測値と計算値の違いは投入地点が測点1( $\chi=1.5m$ )において3.6secと他の測定地点と比べ大きくなっている。堰がある場合でも同様に1.5mで3.5secの誤差となった。他の測定地点においてはどちらの条件もほぼ等しい結果となった。

堰がある場合は堰上げ背水によって堰がない場合に比べると流下時間に差があるが、模型水路においては不等流計算による予測方法が可能であることが確認された。

### 3.3 計算による濃度分布の比較

流下距離におけるピーク濃度の変化を実測値と計算値(不等流計算と移流拡散方程式)により比較した図を図-6に示した。その結果、川幅水深比による計算では、最下流地点22.5mでのみ実測に近い値を示した。

また、模型水路の実験結果から移流拡散係数を逆算し、それから濃度の時間変化を算出して、実測値と比較したものの一例を図-7に示す。拡散係数を逆算して得られた結果を実測値と重ね合わせたところ、実測の方が立ち上がりは遅く、減衰は尾を引く形状であった。

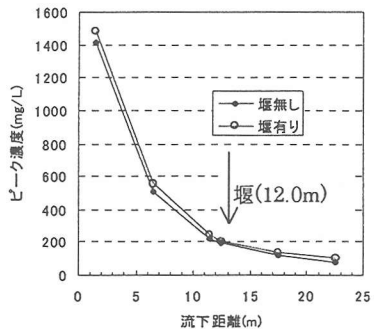


図-4 距離におけるピーク濃度

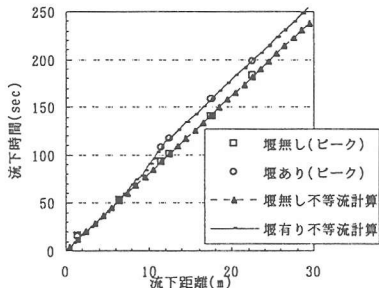


図-5 計算と実測の比較

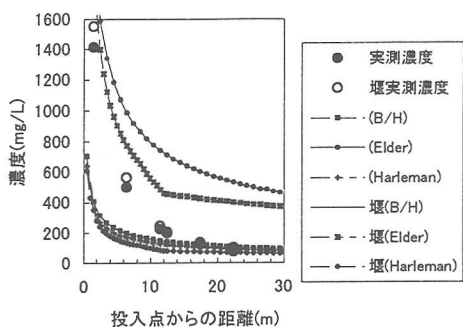


図-6 ピーク濃度の比較

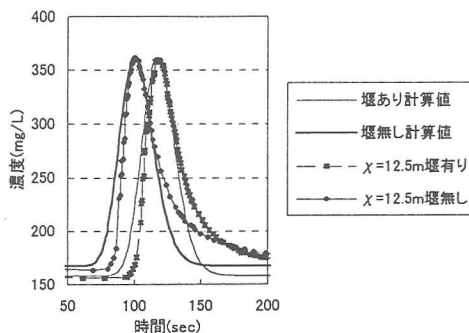


図-7 実測濃度変化

#### 4. 精進川による実験結果

##### 4.1 実測と不等流計算による流下時間の比較

流量観測、同時水位観測における結果をもとに、それぞれの条件下で起算水位、流量、粗度を決定し不等流計算を行った。その結果を表-3に示す。不等流計算の流下時間結果は、堰の上流側の測線3で84.0secもの誤差があった。他の測線についても計算値は堰のある測線2を除き実測値に比較して遅い流下時間となった。

表-3 不等流計算による結果

条件	測線	距離 (m)	流量 (m <sup>3</sup> /s)	粗度係数	実測水位 (m)	計算水位 (m)	実測到達時間 (sec)	時間(不等流計算) (sec)	差 (sec)
堰なし	1	3.02	0.039	0.056	1.067	1.071	10.50	19.46	-8.96
	2	11.53	0.039	0.056	0.985	0.981	34.17	56.12	-21.95
	3	25.38	0.039	0.056	0.903	0.914	85.00	124.08	-39.08
	4	41.35	0.039	0.056	0.802	0.810	153.50	214.22	-60.72
	5	61.60	0.031	0.053	0.682	0.677	280.00	305.53	-25.53
堰有り	1	3.02	0.024	0.044	1.043	1.048	19.67	24.06	-4.39
	2	11.53	0.024	0.044	1.029	1.028	78.33	76.67	1.66
	3	25.38	0.026	0.049	1.027	1.028	167.50	251.50	-84.00
	4	41.35	0.031	0.055	0.788	0.805	300.00	345.37	-45.37
	5	61.60	0.031	0.052	0.677	0.677	401.25	422.69	-21.44

##### 4.2 測線別濃度の比較

###### 4.2.1 実測と移流拡散による測線別濃度の比較

流下距離と濃度の比較として、実測ピーク濃度と代表的な移流拡散係数による計算値の比較図の一例を図-8に示す。川幅水深比により求められるピーク濃度は、堰がない場合は測線4の地点から、堰がある場合は測線5の地点以降で実測ピーク濃度が一致している。

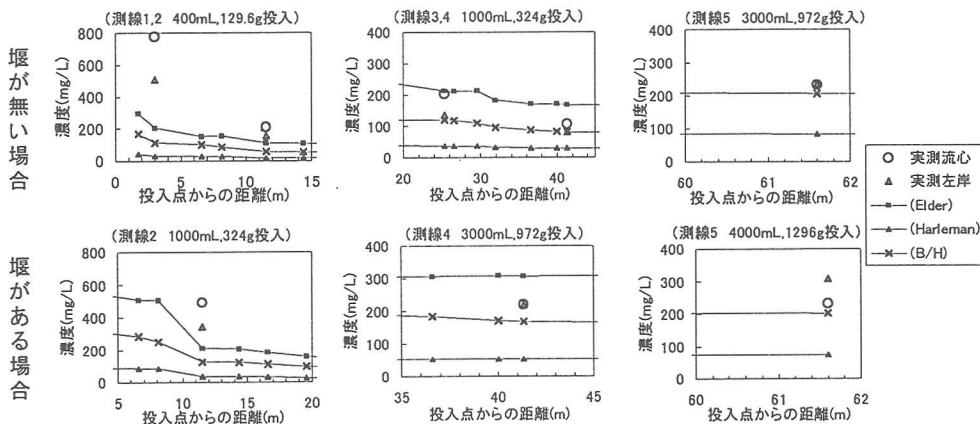


図-8 流下距離による濃度の比較

左岸から投入したピーク濃度においても、堰がない場合は測線 3、堰がある場合は測線 4 より下流の地点で濃度がほぼ一致している。このように、計算によるピーク濃度の予測には、投入地点からある程度の距離が必要であることが判明した。

### 5. 考察

模型水路は堰上げ背水の影響を考慮した設定で行ったが、レイノルズ数は不等流計算の平均流速を用いると 1400 であった。この条件では実河川には適用がむずかしい。また不等流計算の結果からも分かるが、堰の影響は堰上げ背水による流速の減少が、濃度分布を遅らせただけの結果となった。それは実測値の立ち上がり時間を等しくし、図-9 に示すように二つの濃度分布を重ねあわせることによっても証明できる。

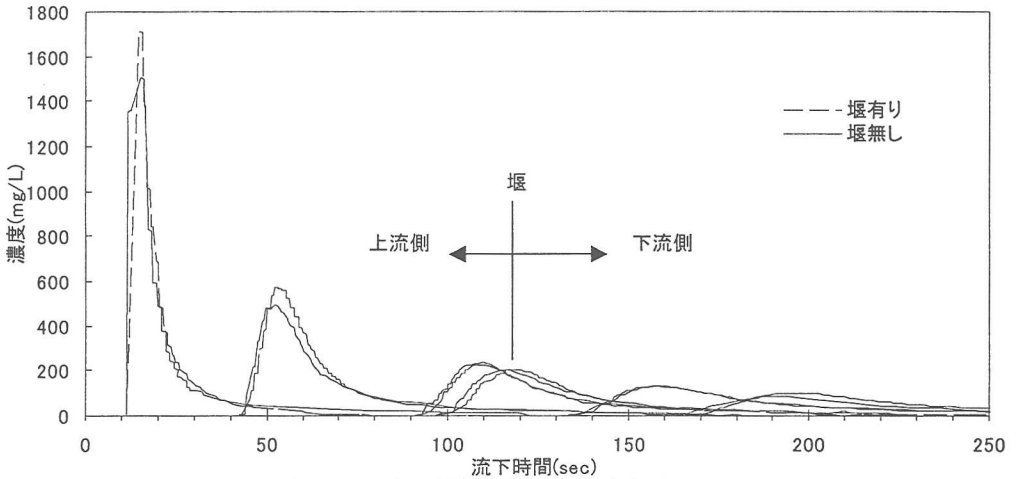


図-9 時系列濃度分布の重ねあわせ

濃度分布が堰でどう変化するかをより理解するには、レイノルズ数が高い設定の条件において実験することが望ましいと思われる。

河川において 1 次元拡散方程式が適用できる範囲は放出した物質が水路幅方向に一樣に広がった後である。混合の初期段階では物質の分布は速度場の影響を強く受けるため 2 次元なり 3 次元の検討を行う必要がある。物質が水路幅全体に広がり、1 次元方程式により濃度分布が追跡可能になる距離は、Fischer による水理実験と数値実験の結果から(5)式で表される。

$$L > 1.8(b^2 \bar{u} / Ru.) \quad (5)$$

ここで、 $L$  は濃度分布が断面全体に広がるまでの距離、 $b$  は川幅の半幅、 $R$  は径深、 $\bar{u}$  は断面平均流速、 $u.$  は摩擦速度である。

今回のそれぞれの実験におけるその値は、模型実験で堰がある場合で 28.0m、堰が無い場合で 29.5m であった。精進川では調査日の平均値で堰がある場合 63.3m、堰がない場合で 51.2m という結果であった。これらの得られた結果を表-4 に示す。

流下距離と濃度の関係をこの式の結果と比較したところ、模型においては試験

表-4 流下距離の計算結果

	条件	移流拡散係数と実測がほぼ等しくなる測線	L による計算	L による適応測線
模型水路	堰がある場合	測点6(22.5m)	28.0m	なし
	堰がない場合	測点6(22.5m)	29.5m	なし
精進川	堰がある場合	測線5(61.60m)	63.3m	なし
	堰がない場合	測線4(41.35m)	51.2m	測線5(61.60m)

区間が22.5mであるので、この式との結果では拡散方程式はどちらの条件も適用できないことになる。

精進川では堰がない場合は測線5以下で濃度分布は均一化されていることになり、堰がある場合は適用範囲外となる。

そこで、移流拡散係数による計算値と実測値がほぼ等しくなる測線において横断方向の濃度分布を比較し、その測線の実測ピーク濃度値の差が横断方向に等しければ、ほぼ濃度が均一化したといえる。式(2)から式(4)の移流拡散係数から得られた計算濃度と実測濃度が近似している測線は、堰がある場合で測線5、堰が無い場合では測線4であった。そこで、その結果から測線4と5の横断方向のピーク濃度を表-5に表す。

表-5 実測値の濃度

測点位置	堰が無い場合				堰がある場合						
	投入量(L)	流心から投入		左岸から投入		投入量(L)	流心から投入		左岸から投入		
		時間(s)	ピーク濃度	時間(s)	ピーク濃度		時間(s)	ピーク濃度	時間(s)	ピーク濃度	
測点4	1.0	3L	172.5	203.4	198.8	192.8	3.0	360.0	318.0	382.5	339.3
		2L	161.0	206.7	185.3	191.9		317.5	325.4	348.8	330.4
		1L	189.5	184.6	211.5	169.1		305.0	325.4	340.0	340.8
		C(流心)	162.0	201.4	180.0	182.0		300.0	360.6	315.0	360.6
		1R	153.5	217.3	181.5	185.9		305.0	357.6	317.5	344.7
		2R	186.5	171.7	216.0	158.7		315.0	326.9	333.8	309.1
測点5	3.0	3L	343.8	298.2	371.3	287.3	4.0	465.0	313.1	437.5	369.0
		2L	318.8	305.3	348.8	288.3		435.0	325.9	377.5	378.8
		1L	292.5	307.6	321.3	298.2		395.0	333.3	348.8	397.6
		C(流心)	280.0	359.5	302.5	350.7		401.3	372.9	350.0	449.1
		1R	273.5	349.2	297.5	331.9		390.0	357.6	333.8	436.2
		2R	276.3	330.8	308.8	330.9		412.5	348.7	347.5	416.9

これらの測線においてトレーサーを流心と左岸から投入した場合で横断方向の濃度分布を表-5から見ると、堰がない場合、測線5で最も右岸の2Rでほぼ近似した濃度が得られている。よってこの測線で濃度が十分拡散したといえる。堰がある場合は、同じ2Rでどちらの測線においても濃度に多少誤差がある。(5)式で得られた結果も同様な結果が得られた。すなわち(5)式により算出された距離以上に投入点から離れば今回の手法により十分現象を説明できることが判明した。

## 6. まとめ

今回精進川の実験で投入量を一定にできなかったのは、濃度が希釈により測定不能とならないようにするためであり、濃度分布を実河川で測定するには、1次元拡散方程式が適用できる距離より長い区間で実験することが、濃度変化の予測を容易に行う手段である。

精進川の流下予測は堰の有無でどちらの条件においても、実測流下時間より遅い結果となった。これは、正しい横断形状や流量、粗度の正確な決定によるのか、流下時間を平均流速で予測するのが不正確であるのか更なるデータの蓄積、研究が必要である。

また、今回の結果、川幅水深比による拡散の式での結果が最も実測に近い値を示しており、この式が実測濃度の予測に最も適した方法であるということがわかった。

## 参考文献

- 1) 玉川 尊、渡邊康玄、斉藤大作、佐藤耕治、甲斐達也：河川における水質事故の移流拡散を考慮した予測手法に関する研究
- 2) 土木学会：水理公式集例題集
- 3) Yotsukura, Fischer, Sayre : Measurement of Mixing Character of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1899-G, 29p, 1970
- 4) 水質事故対策技術 [1995年版]：建設省建設技術協議会技術管理部会水質連絡会編、p44、1995.2.25