

II—40

河川における汚染物質の流下予測について

開発土木研究所水工部環境研究室 正 員 玉 川 尊

正 員 秩 父 亮 一

正 員 中津川 誠

1. はじめに

直轄河川の流水の正常な機能の維持を目的として、通年、定期的な水質調査と共に、水質モニターによる連続自動監視が実施されている。しかし、流域の生活や産業活動から、突発的な水質事故が発生し、時には大きな社会問題となる場合がある。そこで、水質事故等の異常時に対する緊急的な措置対策が、現場の河川管理上必要とされ、こうした対策の中には、流域の汚濁源を調査し、その分布図を作成して置くことや、事故発生の正確な情報を得るための手法や、得られた情報を検討し、速やかに伝達するための予警報システムの確立、事故の被害を最少限に食止めるための措置方法など、様々な対策が考えられる。これらの検討課題の中で、発生した汚染物質が河川に流入した場合、その流下時間を予測することは、下流域での被害の未然の防止、軽減を計る上で重要な対策のひとつである。本研究は、この流下時間を予測するために必要とされる調査方法について、検討した結果を報告する。

2. 調査方法

2. 1 調査方法の選定

一般に汚染物質の事故を想定した流下時間の調査・研究等の報文は、これまで少ない。そのひとつは昭和35年度に、ダム貯水池から農業用水の補給を行うために、河水の到達時間を算出する必要から、①ラジオアイソトープ（以下R Iと略称）をトレーサーとして用いた調査などがある。この他、昭和55年度に旭川開発建設部、石狩川開発建設部が実施した「石狩川・天塩川流達率調査」がある。この方法は、蛍光色塗りのポリエチレン容器に砂を入れて重量調整したものを②目標物として河川を流下させ、数ヶ所のチェック地点で到達時間を計測する方法がとられた。こうした事例とは別に、流下時間の調査方法として③染料による方法や、④電解溶液による方法等も考えられる。

現在、これらの方法で調査を行う場合、①のR Iの使用は、保安手続・運搬貯蔵等の取扱いに規制があり、また、放射線障害物質を公共用水域で使用することは対外的に避ける必要がある。③の染料による方法や、④の電解溶液による方法は、規模の小さい河川では再現性の良く、精度の高い方法であるが、長距離の河川では投入物質の使用量が多くなり、河川環境への配慮を欠くこととなる。そこで、②の目標物による方法が安全である。しかし、目標物が必ずしも流心に添って流下しているとは限らず、堰や淵で停滞し流達時間にバラツキを生じることとなる。また、得られた結果は基本的に調査時の条件に適用範囲が限定され、汎用性に欠けるという問題点もある。このように流下時間を把握するには、現地の河川の規模や流況を加味して調査方法を選択しなければならず、その準備に多大の労力と費用を必要とする。そこで、現地調査が伴わずともどの規模の河川にも適用しうる流下時間の算出方法があれば便利である。本研究は、一般に水理学で行われている“不等流計算による方法”で流下時間を算出し、その精度を実河川で②～④の調査方法を用いて検証することとした。

2. 2 現地における調査内容

2.2.1 事故の種類による調査方法の検討

Runoff Prediction of Pollutant in a River.
by Takashi TAMAGAWA, Ryouichi CHICHIBU and Makoto NAKATSUGAWA

河川の水質事故の中には、化学工場等の事故に見られる使用薬材や、農業生産に使用される殺菌剤・除草剤等の農薬等の①溶解性物質の流出がある。また、石油製品の取扱いの事故による②油類の流出もある。この他、降雨による出水の影響で、河床の底泥が巻き上がり、水中の酸素を消費して起こる③酸欠事故なども事例としてある。このように河川に流入して行く過程で、①の場合は、河水と混合し拡散しながら流下していく形態と、②のように河水より比重が小さい物質は、流水表面に浮き、水面に広がりながら流下して行くものもある。また、③のように河床の底泥が、どこに蓄積されているか不明な場合は、下流域に規則的な形態で流下して行くとは考えにくく、予測が困難のものもある。このような形態の異なる汚染物質の流下時間は相違するものと思われ、本調査では、①の事故を想定し、トレーサーとして電解溶液（塩水）を用い、その流下時間を導電率計による電気抵抗を計測して算出した。また、②によるものは表面浮子の他、ゴム球・木質片を河川の規模、特徴に合せ①と平行して使用した。

2.2.2 調査対象の概要

本調査では表－1に示す3例の規模の違う対象について現地調査を実施した。ここで典型的に異なる対象を選定したのは、スケールが異なれば流れ、特に乱れの状態の差などから、汚染物質の流下メカニズムに対しても影響を及ぼすことが考えられ、このような形の検証を行って一律の手法で規模の異なる対象への適用性を判断してしていくことは、汎用性のある汚染物質流下時間予測のためには必要不可欠といえるからである。この乱れの程度を表す指標としてはレイノルズ数のオーダが参考となるが、それについては表－1に示されている。表でみるように、対象とした各々の例のレイノルズ数からも、スケールと合せて乱れの程度が明らかに異なるものを扱っていることが分る。

表－1 調査河川の諸元

河川名	項目	調査距離 km	流 量 m ³ /sec	河 幅 m	河床勾配	水 深 m	フルード数 Fr	レイノルズ数の オーダー R _e
札内川 (模型水路)		0.0385	0.023	4.16	1/252	0.034	0.302	10 ⁴
厚別川		1.5	0.97 2.22 1.18	7.00 7.20 7.00	1/165	0.223 0.365 0.237	0.421 0.446 0.466	10 ⁵
鵡川		38.5	70.4	124.7	1/741	0.730	0.432	10 ⁶

(数値は下流端とする)

なる対象への適用性を判断してしていくことは、汎用性のある汚染物質流下時間予測のためには必要不可欠といえるからである。この乱れの程度を表す指標としてはレイノルズ数のオーダが参考となるが、それについては表－1に示されている。表でみるように、対象とした各々の例のレイノルズ数からも、スケールと合せて乱れの程度が明らかに異なるものを扱っていることが分る。

調査対象の1つは、当所石狩水理実験場にある札内川の大規模実験水路である。これは現地の1/50のスケールの移動床実験水路であり、ここでの実験で計測された水理データを基に不等流計算を行うとともに、水路に観測地点を2地点置き、塩水とゴム球・木質片を上流端より投入して流下させ、両者の結果を比較検討した。

厚別川は、フィールドによる調査としては比較的小規模な河川となっている。調査の流況は、低水、豊水その他、渇水期のデータも考慮に入れたが時期を逸した。現地での予備調査では、観測距離を25m間隔で横断測量を行い、本調査では観測距離を4区間に区分し、区間ごとに塩水と表面浮子・ゴム球を投入してその流下時間を観測した。また、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を実施した全地点で行って、後の不等流計算の検証データとした。

鵡川は、流路延長 125Kmのうち中下流部の約40Kmを調査の対象区間とした。この規模の河川となると、塩水の使用は追跡・検出が困難なため浮子・ゴム球を投下してその流下時間を区間ごとに観測した。また、断面形のデータとしては昭和56年度に実施された200mピッチの河川大横断図を用いている。さらに流量データは同日定期観測によるものを参考にしたが、不等流計算の検証に必要な水位については、調査時に大横断図が作られているのと同じ地点で観測した。

3. 調査結果

3. 1 札内川大型模型実験水路

札内川の大規模実験水路図を、図－1に示す。図中の数値は、区間距離(m)である。また、流下時間

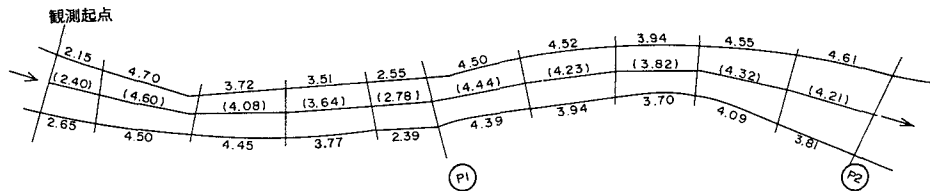


図-1 札内川大型模型実験水路図

の実験結果の比較図を、図-2に示すとともに、図-3に塩水の到達時間比較図を示す。

実験では、塩水（ピーク）の流下時間は観測地点である17.5m(P1)と38.5m(P2)では、52.8秒(P1)と114.5秒(P2)という結果であった。これと平行して投入したゴム球・木片は、塩水（ピーク）より速く37.8秒(P1)と84.8秒(P2)で通過している。この時間差は、P1で15.0秒、P2で29.7秒で、単位距離で0.8秒/mであった。また、不等流計算では下流端の起算水位を1.451mとし、実測水位と比較しながら上流端まで試算した。しかし、この模型実験水路では移動床で、やや複雑な形状をした断面をもっており、広矩形断面での計算法では河床の形状を平均化しているため、流れの再現性に誤差が生じることが懸念される。そこで本例においては、一般断面による不等流計算法で行うこととした。

この計算では、粗度係数を $n=0.016$ での流下時間は、P1で45.0秒、P2で106.5秒となり塩水（ピーク）よりP1で7.8秒、P2で8.0秒速かった。この時間差は観測起点からP1で変化が大きかったが、P1からP2では同一速度であった。この傾向は実測の平均流速（ Q/A ）と、ほぼ同じパターンを示している。また、図中に示していないが塩水濃度の立上がり不等流計算による流下時間は、塩水の方がP1で約3秒、P2で9秒ほど速くなっている。

事故物質の流下時間は、主にその塩水濃度の立上がりの時間で代表される。しかし、流出物質の影響が薄れる時間も検討する必要がある。実測では減少点が明確でなく判定が難しい、そこでピークから減少に向かう傾きの延長線がバックグラウンド値に交差した時間をここでは便宜上、減衰濃度として用いた。その

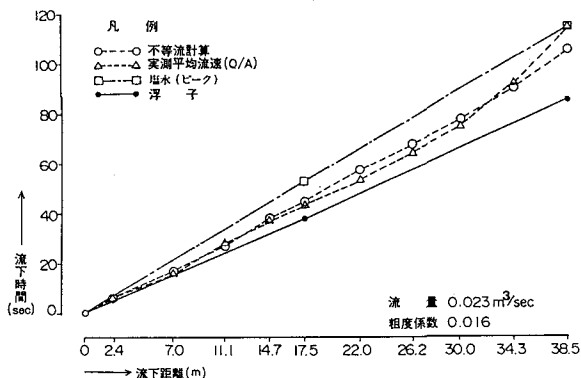


図-2 模型実験水路流下時間比較図

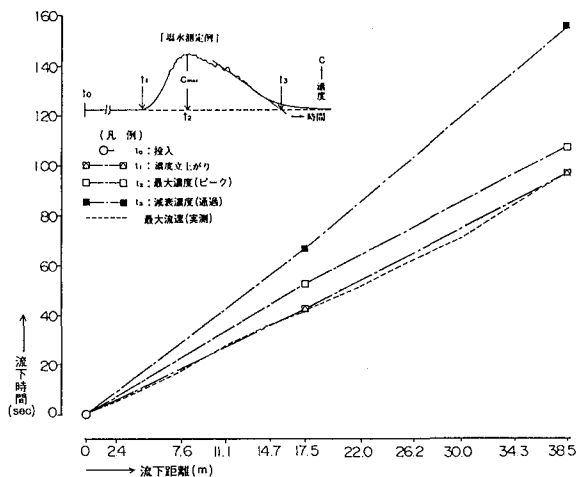


図-3 塩水の到達時間比較図

結果、P1では66.4秒、P2で 155.5秒とピークより14秒(P1)から41秒(P2)程経過し、立上がりからではP1で24秒、P2で59秒の塩分測定時間があった。

3. 2 厚別川

厚別川の調査位置図を図-4に示すとともに、調査結果を表-2の観測一覧表に示した。また、各流況ごとにおける流下時間の比較図を、図 5-1, 図 5-2, 図 5-3に表した。

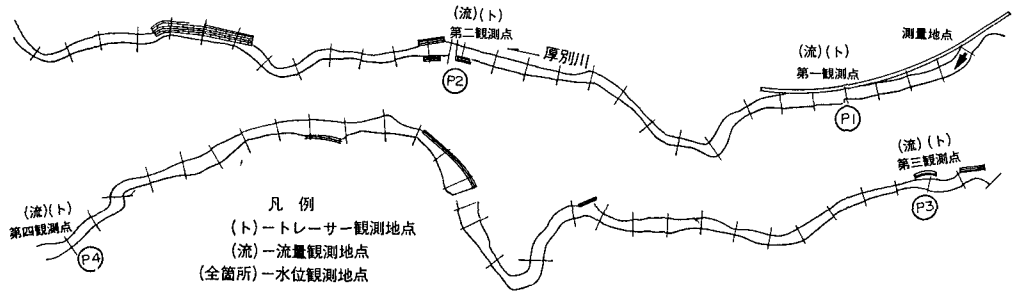


図-4 厚別川調査位置図

表-2 厚別川観測一覧表

項目	観測地点 K.P	区間距離 km	水 位 m	Q m³/sec	断面積 m²	平均流速 m/sec	流下時間 (min)	最大流速 m/sec	流下時間 (min)	表面浮子 (min)	ボール (min)	塩 水 (min)			不等流 計算 (min)
												立上がり	ピーク	流 表	
第 1 回	2/3	0.1	116.043	0.97	1.56	0.62	2.7	0.62	2.7	1.6	—	2.1	2.8	1.6	2.4
	9/2	0.3	112.590	1.02	1.83	0.56	8.9	0.93	5.4	6.5	7.0	7.0	8.6	14.5	7.3
	5/2	0.4	108.988	1.24	1.59	0.78	8.6	0.95	7.0	8.7	7.0	7.9	10.1	16.5	9.3
	8/1	0.7	102.010	1.08	1.69	0.64	18.2	1.23	9.5	13.6	—	17.1	21.3	31.7	18.1
		1.5		1.08		0.65	38.4	0.93	24.6	30.4		34.1	42.8	64.3	37.1
第 2 回	2/3	0.1	116.248	2.22	2.63	0.84	2.0	1.13	1.5	1.5	1.0	1.1	1.4	2.2	1.8
	9/2	0.3	112.732	2.52	2.70	0.93	5.4	1.36	3.7	4.6	—	4.2	5.2	5.2	5.1
	5/2	0.4	109.270	2.42	2.63	0.92	7.2	1.19	5.6	4.4	4.8	5.3	6.3	9.1	7.3
	8/1	0.7	102.216	2.88	2.95	0.98	11.9	1.66	7.0	12.5	11.2	12.1	14.9	20.7	12.6
		1.5		2.51		0.92	26.5	1.34	17.8	23.0		22.7	27.8	37.2	26.8
第 3 回	2/3	0.1	116.101	1.18	1.66	0.71	2.3	0.98	1.7	1.6	1.6	1.4	1.9	3.8	2.4
	9/2	0.3	112.654	1.06	1.90	0.56	8.9	0.74	6.8	5.8	5.8	5.8	7.4	10.5	7.7
	5/2	0.4	109.197	1.18	1.78	0.66	10.1	0.93	7.2	7.0	7.0	7.3	9.1	15.9	11.9
	8/1	0.7	102.125	1.12	2.05	0.76	23.3	0.79	14.8	14.1	14.0	15.5	19.6	33.1	20.2
		1.5		1.14		0.61	44.7	0.86	30.4	28.5	28.4	30.0	38.0	63.3	42.2

・ 上段:水深6割 下段:表面

3.2.1 第1回調査結果

初回の調査は、低水時の流況に相当する。不等流計算から求めた流下時間は、塩水濃度の立上がりと流量観測の平均流速の中間に位置する。また、最大流速と浮子はK.P.2.5まで小差であったが、下流端でその開きが拡大している。

3.2.2 第2回調査結果

降雨による出水で、流量も初回の2倍で、流況として豊水にあたる。不等流計算と塩水（ピーク）、平均流速がほぼ同様な流下時間を示し、浮子と塩水濃度の立上がりも同じであった。また、最大流速と浮子は初回と傾向が類似していた。

3.2.3 第3回調査結果

最終回の流量規模は、初回のそれとほぼ同じで

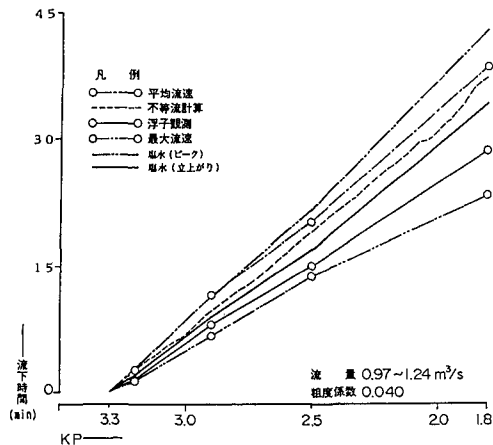


図 5-1 流下時間比較図（第1回）

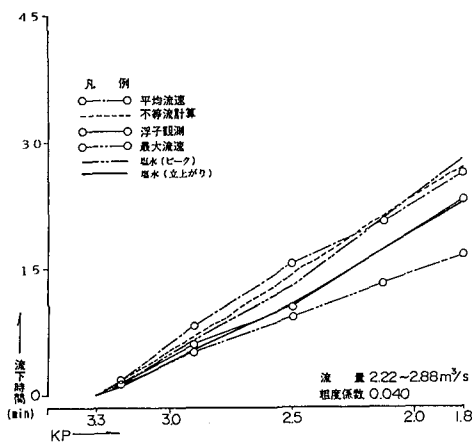


図 5-2 流下時間比較図 (第2回)

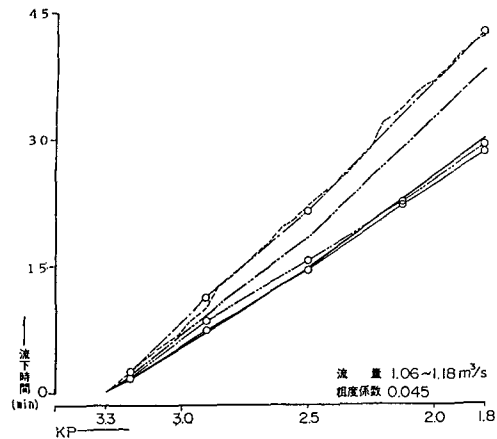


図 5-3 流下時間比較図 (第3回)

あったが、ここにおいて現地調査から各項目の流下時間を算出すると、不等流計算で前2回と同様な粗度係数では、実測の平均流速よりさらに遅れた値を示した。これは、実測水位に合わせて逆算した粗度係数($n=0.060$)が予想外の値であったことから、その原因が第2回時の出水による河床の変動によるものとみて、改めて横断測量を行った。その結果、ほぼ全断面で変形していた。従って、第2回、第3回の不等流計算は再測量による断面形によって計算を行っている。

油類の事故を想定した浮子の流下時間は、札内川の大型模型実験水路や厚別川の第2回の調査で、ほぼ塩水の初期到達と近い値を示している。

3.3 鵜川

鵜川の調査地点を図-6に示す。流況は平水に近く調査区間に3ヶ所の堰があるが、特に浮子の流下の障害とはならなかった。しかし、河床データが一部の区間で現況と異なっているため、調査結果は区間を区切ってとりまとめ、図-7にその流下時間の比較図を示す。

不等流計算による流下時間は、K.P 32からK.P 17までの15kmで3.9時間で、この時の平均流速の値は3.8時間であった。浮子は3.4時間で不等流計算と0.4時間の差で、最大流速より0.9時間遅かった。



図-6 鵜川調査地点図

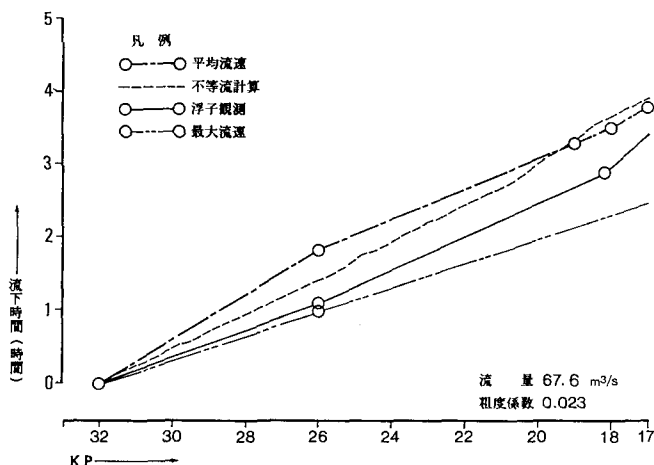


図-7 鵜川流下時間比較図

不等流計算によって求めた流下時間と、実測に基づいた平均流速による流下時間は、前2例と同様にほぼ再現されている。ここで、平均流速と浮子の流下時間の関係から、その比をとると約 1.3倍となる。この値は、札内川大型模型実験水路で 1.4倍、厚別川で 1.3～1.4 倍となっており、この関係から類推すると、鶴川の不等流計算によって再現された流れで、およそ塩水のピークの流下時間を予測しうると考えられる。このように、一級河川程度の規模をもつ河川においても上記手法による流下時間の予測に対する可能性が示唆された。これについては、さらなる実証的検討を重ねる必要があろう。

4. 考察

トレーサーと実測値の関係では、塩水のピークは平均流速で流れ、不等流計算による流下時間もこの流れに近似している。浮子やゴム球は平均流速より速く、最大流速に近い流れを示すとともに、塩水濃度の立上がりとも同じであった。このようにトレーサーの種類によって流下時間が異なることが分った。また、流量の規模により特徴があり、厚別川第2回の豊水規模の流下時間における不等流計算法、平均流速、塩水（ピーク）の一致は、利根川・江戸川などで最高水位（最大流量）の到達時間が平均流速による計算値と合致した結果や、空知川の流下速度測定調査で、最大水位（最大流量）のRⅠ流下と一致すると言う見解などと同様な結果が得られた。しかし、流量規模がどの程度からこのことが言えるのか明確ではない。

5. あとがき

水質事故における汚染物質の流下時間を予測するための手法として、今回、水理学による不等流計算法を用いることとした。そこで、この方法がどの河川でも適用可能かを検証するため、模型水路、小河川、大河川の規模の異なる実河川について調査を行った。その結果、シアンや農薬のような溶解性の汚染物質の流下時間は、塩水で代表された。そのピーク濃度が平均流速や不等流計算で追尾できることがこれまでの結果から言える。しかし、油類の事故を想定した浮子類の流下時間が、最大流速で評価できるか、まだ明確ではない。また、不等流計算法による流下時間の予測方法の汎用性を高めるためには、ここで調査対象とした厚別川や鶴川とは規模の異なる、中河川や大河川、勾配のある急流河川などを調査して、その精度を高めていくことが今後の課題である。

不等流計算法の利点は、どの流況にも対応ができ、河川の規模による手法の選択も必要ないなどの勝れた特徴がある。その基礎データとなる河道の縦横断測量等の資料は、河床変動調査など河道計画の諸種の調査のために定期的に行われている。こうした現況の河床データを常に押えておくことが重要であり、かつ、収集したデータで予備計算を試みておき、緊急時には発生地点の下流部の観測水位を、起算水位とした流下時間を逐次求めることから、事故被害の軽減・防止に寄与することが可能となる。

最後に、本研究に際して貴重を資料を提供していただいた室蘭開発建設部治水課の各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 小浜実、渡辺貞夫、林信雄、稲葉誠一：RⅠ利用による空知川流下速度測定について、昭和35年度、第4回、北海道開発局技術研究発表会論文集、p213-219、1960。
- 2) 小浜実、渡辺貞夫、林信雄：空知川流下速度測定調査（第2報）、昭和36年度、第5回、北海道開発局技術研究発表会論文集、p242-246、1961。
- 3) 北海道開発局旭川開発建設部管理課：天塩川・石狩川流達率調査報告書、昭和55年度、
- 4) 北海道開発局土木試験所河川研究室：現場のための水理学、1988年1月、p1-24。
- 5) 伊藤剛、佐藤清一、吉川秀夫、芦田和男、鈴木博安、土屋昭彦：洪水流に関する研究、土木研究所報告、第100号、昭和36年1月、p145-160