

II-53

河川の水質事故物質の流下拡散について

北海道開発局帯広開発建設部 正員 玉川 尊
 北海道開発局開発土木研究所 正員 中津川 誠
 北海道大学 工 学 部 正員 長谷川和義

1. はじめに

河川流域の産業活動により、その事業施設から発生する排水は処理施設を経て河川等に排出されている。しかしながら、これらの施設の管理の不善や事故あるいは河川への不法投棄により水質事故が発生し、時には魚類のへい死や上水の取水停止を招くことがあり、このような水質事故への対応が河川管理上重要な課題となっている。特に、発生した水質事故の汚染物質が、流下過程でどのような変化を示すか予測することは、下流域での被害の未然の防止、軽減を図る上で重要な課題のひとつと言える。

本研究の前報¹⁾では、汚染物質の流下時間に焦点をおいた。ここでは、その推定方法として、現況の水位等の水理量から不等流計算によって流下時間を予測する手法を提案した。その結果、トレーサのピーク濃度はほぼ平均流速にしたがって移流し、不等流計算がその流下時間をほぼ近似しうることを確認した。以上の成果を踏まえて、今回は汚染物質の流下過程で水質濃度自体がどのように変化するかを把握するため、これまで検証例の少ない実河川を対象に調査・解析を行った。ここでは、水質変化の推定に拡散方程式によるモデル計算を用いている。なお、この際、分散係数が水質濃度を規定する重要な要因であるが、今回おこなった現地調査や、アメリカの河川での解析例をもとに、それが川幅・水深比のような河道水理諸元により決定できることを確認した。

1. 調査の概要

1) 調査対象河川

今回は、図-1に示す札幌市内外の3河川を対象に現地調査を実施した。この中で喜茂別川は急流の山地河川、島松川は平地河川、厚別川は前2例の中間の河川として調査対象に選んだ。それぞれの河道と水理諸元を整理し、表-1に示す。

表-1 調査対象河川の諸元

河川名	調査年月	流下距離 (m)	流量 (m ³)	平均川幅 (m)	水面勾配	平均水深 (m)	Froude 数	Reynolds 数
喜茂別川	1990.9	970	1.95	10.59	0.0160	0.210	0.359	4.9×10^4
	1990.10	970	3.01	12.36	0.0160	0.245	0.425	6.3×10^4
厚別川	1989.9	300	2.22	8.94	0.0117	0.280	0.622	1.2×10^5
	1989.9	400	2.52	8.94	0.0087	0.290	0.463	2.8×10^5
	1989.9	400	2.42	8.94	0.0100	0.289	0.463	5.4×10^5
島松川	1990.9	500	1.02	7.99	0.0035	0.336	0.215	1.9×10^4
	1990.10	500	1.47	8.35	0.0035	0.364	0.275	2.6×10^4

2) 調査方法

最初に現地の河川測量として水準測量、横断測量を行い、観測時には同時水位観測および流量観測を実施した。さらにこれらと並行し、溶解性物質の流下拡散の調査を行った。流下拡散調査の概念を図-2の調査模式図に示す。

Dispersion of Pollutant in Rivers

by Takashi TAMAGAWA, Makoto NAKATSUGAWA, and Kazuyoshi HASEGAWA

拡散の程度をみるトレーサーとしては、流水中でも不活性な食塩水を選んだ。これを定点より投入し、下流の測点に電導度計を設置し、導電率を測定して食塩水の移流拡散の程度をとらえることとした。この時の測点は横断方向に3点とし、測点間隔はほぼ均等距離とした。また、塩水は3回にわたって投入し、測定を実施した。さらに、同時に浮子も定点より投入し、流下時間の参考データとした。なお、電導度計で実際に計測されるのは導電率だが、これを塩分濃度に変換する必要がある。このために、図-3のような導電率－NaCl濃度関係の検量線を予め作成し、濃度の換算に用いる。以上の調査は時期を変えて計2回実施した。

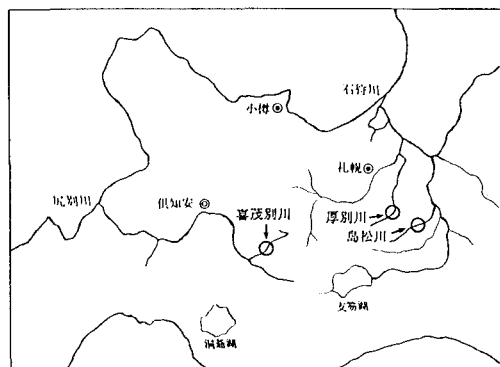


図-1 調査河川の位置図

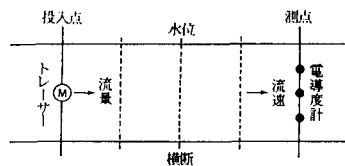


図-2 調査の模式図

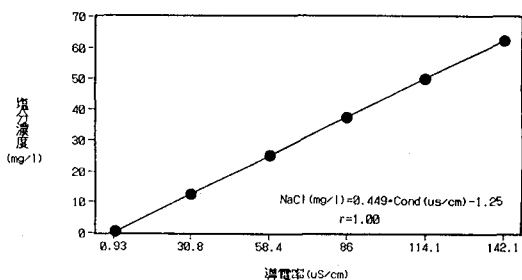


図-3 導電率と塩分濃度の関係

2. 分散係数の推定

水質変化の推定には次のような Fick の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

このとき、瞬間投入に対して投入点より x だけ離れた地点での濃度 C は次式であらわされる。

$$C = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Dt}} \exp \left\{ -\frac{(x - ut)^2}{4Dt} \right\} \quad (2)$$

ここで、 M は投入量 (kg)、 A は流積 (m^2)、 u は流速 (m/s)、 D は分散係数 (m^2/s) をあらわす。

これから、ある地点で溶解物質を瞬間投入した場合、その下流の地点で濃度時系列を測定して、分散係数を逆算することを考える。この場合、 $t = x/u$ がピーク時間であり、その時の水質濃度を C_p とすると、

$$C_p = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Dt}} \quad (3)$$

これより分散係数は

$$D = \frac{1}{\pi t} \cdot \left(\frac{M}{2AC_p} \right)^2 = \frac{u}{\pi x} \cdot \left(\frac{M}{2AC_p} \right)^2 \quad (4)$$

となる。

河川の現地調査結果から分散係数を逆算し、それから濃度変化を算出して、実測値と比較したものを図-4に示す。これを見ると、厚別川の例では、計算濃度は立上がり部でやや実測値より立上がり早い、濃度の降下時は再現性がよい。また、島松川の例では計算値が実測値より早く立上がり、ピーク後は減衰が早い。ところで、この例の実測値をみると、濃度変化において上昇部と下降部が非対象となっていることに気付く。原因としてはトレーサーが流下中によどみに捕捉され、徐々に流下してくることで、計算値との違いがあらわれてくると考えられる。ただし両例とも全体的傾向としては計算結果が実測値をよく再現しているといえる。

a) 厚別川 KP 2.9 9月

b) 島松川 10月

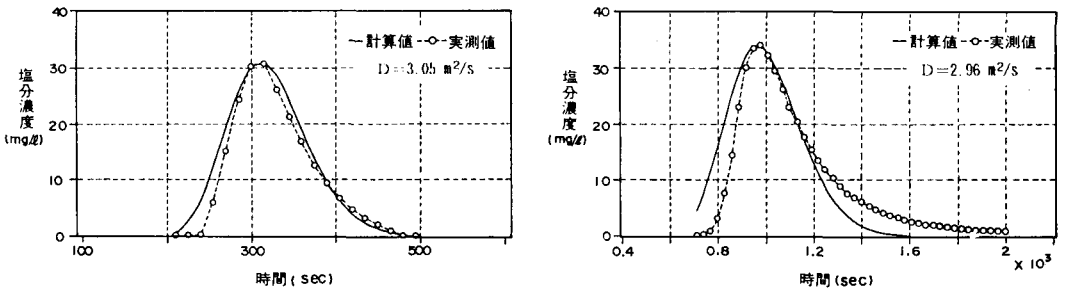


図-4 流下時間と濃度の関係

3. 分散係数と水理諸元との関係

トレーサーを用いた流下拡散（分散）の調査を実河川で頻繁に行うことはできない。また、調査による河川水質への影響を考えると、調査対象や条件も限定される。そこで、実用的意味からは分散係数を河道および水理諸元と関連づけて簡便に推定することが望ましい。

1) アメリカの実河川の調査報告

1967年11月、アメリカのネブラスカとミズーリの両州をまたがるミズーリ川で流下拡散の調査が大々的に行われ、その結果は Yotsukura ら²⁾によって詳しく報告されている。対象河川の調査区間は141マイル(227km)、川幅は800～950フィート(244～290m)にわたる。そこで、600ポンド(272kg)のロードミンWTの20%色素液を定点から投入して、170時間にわたる追跡調査を実施している。また前年には、同河川で120ポンド(54kg)のロードミンBAの染料をトレーサーとした調査を行っている。これらの調査結果の他に、実験水路での測定結果も加えて Fukuoka ら³⁾が、分散係数と水理諸元との関係を検討している。この中では、規模や水理条件の異なる河川について、川幅水深比と分散係数との関係などが整理されている。表-2にはミズーリ川の調査を含む事例に関し、その際の水理諸元と得られた分散係数を示す。

表-2 アメリカ実河川の水理条件と分散係数

河川名	$h(m)$	$u(m/s)$	$B(m)$	B/h	$D(m^2/s)$	D/uh
Missouri	3.26	1.63	180	55.2	921	173
Copper Creek	0.37	0.22	18	48.6	9.9	121
Powell	0.88	0.16	37	42.0	9.5	67.5
Green-Duamish	1.1	0.29	20	18.2	7.4	23.2

2) 川幅水深比と分散係数の関係

表-3には、著者らが調査した実河川の水理諸元と分散係数を示す。前述の式(4)より算出した各々の河川の分散係数(D)は、喜茂別川が14.11～15.48、厚別川では区間別によるが3.05～5.26、島松川は2.86～2.96

という結果になっている。また、川幅水深比に関しては、喜茂別川では、調査時期で流量が異なるが、約50.4と一定で、厚別川では28.6~35.2となっている。島松川は喜茂別川と同様に22.9~23.8の範囲にある。

表-3 調査対象河川の水利条件と分散係数

河川名	調査年月	<i>h</i> (m)	<i>u</i> (m/s)	<i>B</i> (m)	<i>B</i> / <i>h</i>	<i>D</i> (m ² /s)	<i>D</i> / <i>uh</i>
喜茂別川	1990.9	0.210	0.515	10.59	50.4	14.11	130.6
	1990.10	0.245	0.658	12.36	50.4	15.48	96.0
厚別川	1989.9	0.280	0.955	8.94	30.0	3.05	11.41
	1989.9	0.290	1.048	8.94	28.6	3.74	12.34
	1989.9	0.289	0.780	8.94	35.2	5.26	23.30
島松川	1990.9	0.336	0.389	7.99	23.8	2.86	21.87
	1990.10	0.336	0.520	8.35	22.9	2.96	15.66

ここで、*h*は平均水深、*u*は平均流速、*B*は平均川幅、*D*は分散係数。

算出された分散係数は、流速と水深の積で除して無次元化し (*D*/*uh*)、川幅水深比 (*B*/*h*) と比較している。これをプロットしたものが図-5である。図中には先に述べたアメリカでの観測結果も示してある。図-5より回帰式を求めると、

$$\frac{D}{uh} = 2.92 \times 10^{-3} \left(\frac{B}{h} \right)^{2.62} \tag{5}$$

となる。

これから、分散係数と川幅・水深比に対応関係が見出だされる。このことは、分散の程度が河川の横断方向と水深方向の乱れのバランスに規定されることを示唆するものである。以上により、河道諸元と水利条件から大河川から小河川まで分散係数の推定が可能となった。

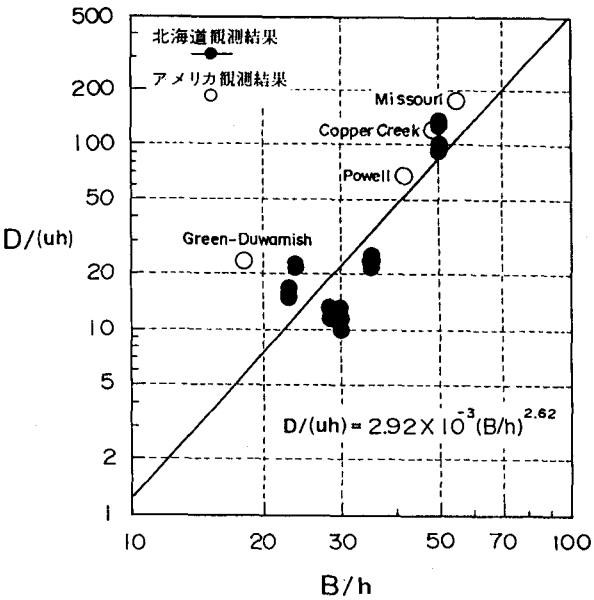


図-5 川幅水深比と分散係数の関係

4. 水質影響予測手法について

1) 不等流計算による流下時間の算出

前報で調査対象とした厚別川をモデルにして、汚染物質の流下拡散のシミュレーションをおこなった。最初にその時の水利データを踏まえて、流量の違いによる流下時間を不等流計算をおこなって求めた。なお、この際の下流端水深は各流量時の等流水深としている。不等流計算による水理量の再現性は同時水位観測データから実証されており、それについては前報に詳述してある。図-6にこれから得られた流下時間を流下距離との関係で図示している。

2) 水質濃度変化のシミュレーション

前述の不等流計算により、流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ のケースを例とし、平均水深、平均流速を算出し、 uh 、 B/h を求めた。また、式(5)により分散係数を推定した。この条件下においてシアン 100g が投入された場合を想定し、シアン濃度が環境基準値を下回る過程の水質濃度変化を計算したものを図-7に示す。ここで、実線は投入後の各流下距離でのシアンのピーク濃度の逓減をあらわす曲線である。これから、水質事故発生点の下流 1.264km で環境基準値を下回ることがわかる。

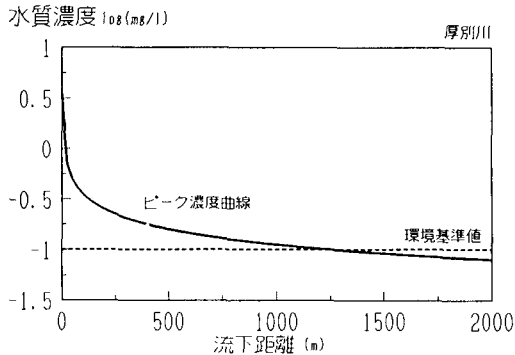


図-7 水質濃度変化のシミュレーション例
(シアンピーク濃度の例)

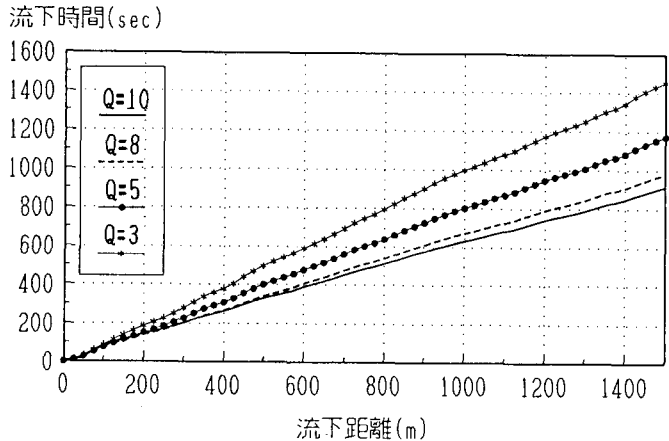


図-6 流量規模別の流下時間
(不等流計算による算定)

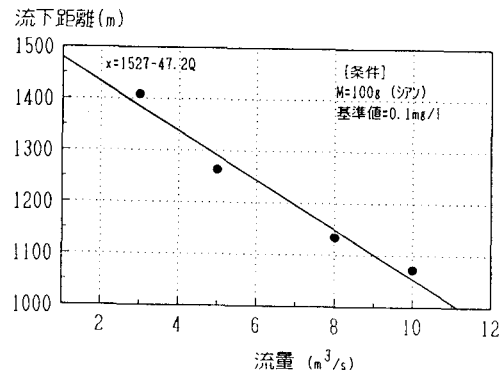


図-8 流量規模別の環境基準値への到達距離
(シアンピーク濃度の例)

上記のように、水理条件と投入した物質量がわかれば、濃度変化が推定できる。図-8には各流量規模毎にシアン 100g を投入した場合に、環境基準値を下回るまでの流下距離を算出し、流量と、その流下距離の関係を示す。このようなダイアグラムを水理条件(流量)、事故の規模(投入量)別に作成しておくことで、水質事故の影響範囲を汎用的に特定できる。これは、事故への対応にとって、きわめて有益な情報を与えるものといえる。

5. 結論

以上の結果を結論としてまとめる。

- (1) 実用的には、実河川の分散係数が流速や水深、川幅などの水理量から推定可能である。
- (2) 分散係数と川幅水深比との対応関係が見出され、このことはアメリカの実河川における調査結果からも検証された。
- (3) 事故物質の流下時間は、不等流計算を用いて推定することが可能で、これと拡散方程式の解から水質濃度変化のシミュレーションが可能となった。
- (4) 流域からの流入が予想される有害物質について、任意の投入量と流量を設定し、水質濃度変化のシミュレーションにより水質事故の影響範囲を汎用的に特定することができるようになった。

あとがき

水質事故物質の流下予測に関する手法として、前報では不等流計算の実河川への適用を図った。この中では溶解性トレーサー濃度のピーク到達時間が不等流計算で再現できることを確認した。今回は、これを一歩進めて汚染物質の濃度変化予測を不等流計算と拡散方程式を組合せて行う手法を提示した。この際、分散係数が川幅水深比によつて的確に推定できることを示した。このような水質濃度のシミュレーションにより、有害物質の影響予測が可能となり、取水施設への迅速な対応など下流での被害の未然防止や軽減処置に役立つと考えられる。

なお、この他、電磁流速計で流速測定を行い、流速成分のラグランジュ相関から乱流拡散係数を求める方法も試みた。しかしながら、機器類の精度の問題がクリアできずに十分な成果を得ることができなかった。今後は流水の乱れに起因する瞬間濃度の変動が水生生物にどのような影響を与えるかを、考慮した解析も必要である。また、河川における水質事故件数の半数を占める油の流下拡散についても重要な研究課題の一つである。

参考文献

- 1) 玉川尊, 秩父亮一, 中津川誠: 河川における汚染物質の流下予測について, 平成元年度土木学会北海道支部論文報告集, No.46, 391-396, 1990.
- 2) Yotsukra, N., H. B. Fischer, and W. W. Sayre: Measurement of Mixing Characteristics of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska, U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1899-G, 29p, 1970.
- 3) Fukuoka, S., and W. W. Sayre: Longitudinal Dispersion in Sinuous Channels, J. of the Hydraulics Division, Proc. of ASCE, 195-217, 1973.